

宮崎大学大学院

博士学位論文

屋外用電気絶縁機器における
ポリマー外被材料の電気的特性

2012年3月

宮崎大学大学院農学工学総合研究科

博士後期課程

物質・情報工学専攻

三宅 琢磨

目次

記号の説明	iv
Abstract	v
第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本論文の概要と構成	3
第2章 ポリマー碍子の曝露試験	4
2.1 曝露試験の背景	4
2.2 唐津での曝露試験	4
2.2.1 屋外曝露試験概要	4
2.2.2 曝露試験結果	8
2.2.2.1 EVA 通り碍子	8
2.2.2.2 EVA 引き留め碍子	13
2.2.2.3 SiR 碍子	13
2.2.2.4 磁器碍子	17
2.2.2.5 累積ドライバンドアーク放電電気量の比較	17
2.3 宮崎大学構内での曝露試験	17
2.3.1 曝露試験概要	17
2.3.2 曝露試験結果	18
2.4 まとめ	20
第3章 不溶性汚損物質がポリマー材料の電気的特性に与える影響の評価	21
3.1 はじめに	21
3.2 汚損湿潤試験	21
3.2.1 汚損湿潤試験方法	21
3.2.2 試験結果	24
3.3 表面汚損物が試料に与える影響の検討	28
3.3.1 水分の吸着状態	28
3.3.2 ギャップの影響	29
3.4 複合汚損試験	33
3.4.1 複合汚損試験方法	33
3.4.2 試験結果	34
3.5 まとめ	39

第4章	ポリマー材料の耐候性評価	40
4.1	ポリマー材料の耐候性評価の背景	40
4.2	評価方法	40
4.3	試験結果	43
4.3.1	塩霧試験による電気的特性評価	43
4.3.1.1	EVA系引留め碍子	43
4.3.1.2	SiR系引留め碍子	47
4.3.1.3	SiR系引留め碍子A(レーストラック)	50
4.3.1.4	SiR系引留め碍子B(レーストラック)	53
4.3.1.5	EPDM系引留め碍子	56
4.3.1.6	SiR系通り碍子	59
4.3.2	FT-IRによる組成分析結果	61
4.3.2.1	EVA系引留め碍子	61
4.3.2.2	SiR系引留め碍子	69
4.3.2.3	SiR系引留め碍子A(レーストラック)	73
4.3.2.4	SiR系引留め碍子B(レーストラック)	78
4.3.2.5	EPDM系引留め碍子	83
4.3.2.6	SiR系通り碍子	90
4.3.2.7	EVA系通り碍子	94
4.3.3	STRI法により評価した表面撥水性	98
4.3.3.1	新品SiR碍子	98
4.3.3.2	SiR系引留め碍子	98
4.3.3.3	SiR系引留め碍子A(レーストラック)	101
4.3.3.4	SiR系引留め碍子B(レーストラック)	103
4.3.3.5	SiR系通り碍子	106
4.4	まとめ	108
第5章	直・交流課電時におけるポリマー材料の電気的特性の比較	110
5.1	はじめに	110
5.2	塩霧試験	110
5.2.1	塩霧試験方法	110
5.2.2	試験結果	113
5.3	試料表面の撥水性への影響	130
5.3.1	Dynamic Drop Test	130
5.3.1.1	Dynamic Drop Testの概要	130
5.3.1.2	撥水性消失までの過程	131
5.3.1.3	試験方法	133
5.3.2	試験結果	135
5.3.2.1	導電率の影響	135
5.3.2.2	滴下数の影響	137

5.3.2.3	撥水性消失の要因	138
5.4	複合汚損試験	140
5.4.1	複合汚損試験方法	140
5.4.2	試験結果	142
5.4.2.1	との粉汚損	142
5.4.2.2	鉄粉汚損	144
5.4.2.3	銅粉汚損	146
5.4.2.4	カーボン汚損	148
5.4.2.5	混合汚損	149
5.4.2.6	各種電圧による累積電気量及び表面状態の比較と検討	151
5.5	まとめ	153
第6章 結言		155
6.1	本論文の要約	155
6.2	今後の課題と展望	156
付録		158
参考文献		172
本論文に関連する学術論文と学会発表論文		174
謝辞		177

記号の説明

本論文で使用した記号の意味を以下に示す。

略語

ATH (alumina tri hydrate)	: 三水和アルミナ
CIGRE (International Council on Large Electric Systems)	: 国際大電力システム会議
DDT (dynamic drop test)	: ダイナミックドロップテスト
EdF (Electricite de France)	: フランス電力公社 環境複合加速劣化試験
EPR (ethylene propylene rubber)	: エチレンプロピレンゴム
EPDM (ethylene propylene diene monomer)	: エチレンプロピレンジエンモノマー
ESDD (equivalent salt deposit density)	: 等価塩分付着密度
EVA (ethylene vinyl acetate)	: エチレンビニルアセテート
FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscope)	: フーリエ変換赤外分光法
HC (hydrophobicity classification)	: 撥水性クラス
HTV (high temperature vulcanized silicone rubber)	: 高温加硫型シリコーンゴム
LMW (low molecular weight)	: 低分子量成分
LSR (liquid silicone rubber)	: 液状シリコーンゴム
NSDD (non-soluble deposit density)	: 不溶性物質付着密度
SiR (silicone rubber)	: シリコーンゴム
STRI (Swedish Transmission Research Institute)	: 撥水性評価法
ZnO (zinc oxide)	: 酸化亜鉛

Electrical characteristics of polymeric housing materials for outdoor power apparatus

Takuma Miyake

*Doctoral Course in Materials and Informatics
Interdisciplinary Graduate School of Agriculture and Engineering
University of Miyazaki*

Submitted at 5 December, 2011

Abstract

Recently, much attention has been paid to polymeric materials for housing of electric power apparatus. However, because polymeric material is made of organic matter, the aged deterioration is anxious. The widely used polymeric materials for housings are silicone rubber (SiR) and ethylene vinyl acetate (EVA). These polymeric materials have some excellent properties such as light weight, hydrophobicity, and weathering resistance. Additionally, even if the hydrophobicity initially disappears by external stresses, the hydrophobicity recovers because of the migration of low molecular weight SiR in a short time. The lifetime of polymeric material is influenced by environmental conditions such as ultraviolet, acid rain, and polluted deposits. The change of the surface condition of polymeric material causes dry band arc discharges. Thus, to widely spread the use of polymeric insulators, the degradation mechanism should be clearly investigated.

In order to investigate how environment affect electrical characteristics of polymeric materials, we first compared cumulative charges obtained from an exposure test performed in different environments. The cumulative charges due to dry band arc discharges in Karatsu city in which environment is comparatively severe for 28 months were evaluated, and their

cumulative charges for EVA (LP) insulator, EVA (anchor) insulator, SiR insulator, and porcelain insulator were 225 C, 27 C, 6.2 C, and 514 C, respectively. Furthermore, the hydrophobicity of fluorine of the mold lubricant was lost after 54 months from the beginning of the exposure test. However, it was considered that EVA (LP) insulator still had enough insulation performance because leakage current was low. On the other hand, the cumulative charge for EVA (LP) insulator arranged in Miyazaki city where environment is not severe for 13 months was 55 C. The exposure test in Miyazaki city was stopped when rapid contaminations due to typhoons occurred. It was confirmed that the change of the environment influenced on the cumulative charge due to dry band arc discharges.

Secondly, to investigate the relationship between insoluble pollution and occurrence of dry band arc discharge, we performed a fog test and a composite pollution test with EVA samples. For both tests, the cumulative charge of dry band arc discharge increased only for a mist period at all non-soluble deposits density (NSDD) conditions. The charge of conductive current increased for all periods. The increase tendency of the charge became large with increasing NSDD.

Thirdly, to understand the long-term reliability of the insulation performance of polymeric materials, the salt fog tests were performed on the polymeric insulators made of EVA and SiR. The hydrophobicity was also evaluated. The samples which 11 years have passed since the installation were taken away from an actual distribution system in the region where pollution condition was comparatively severe. EVA insulators had enough insulation performance although the dry band arc discharge during the salt fog test occurred. For SiR insulators, obvious some traces were confirmed on the surfaces of sheds; however, the leakage currents were small. In addition, it was confirmed that superior hydrophobicity was maintained. Thus, the obtained results showed that polymeric insulators we examined here had enough insulation performance.

Finally, to understand the long-term reliability of the insulation performance of polymeric materials, a composite pollution test of a liquid silicone rubber (LSR) was performed with dc or ac voltage application. Additionally, to evaluate characteristics of temporal lowering of

hydrophobicity, a dynamic drop test (DDT) was performed with dc or ac voltage application. After the composite pollution test, discharge crater and heavy erosion were confirmed around a cathode electrode when dc voltage was applied. In the case of ac voltage application, discharge crater was confirmed around a grounding electrode. There was little influence of the polluted deposits in the area where a discharge crater was confirmed. In the contrast, the initiation time of leakage current and cumulative charge was varied depending on polluted deposits. In addition, it was found that the difference in the polluted deposits in the case of dc voltage application was larger than that in the case of ac voltage application. Furthermore, the hydrophobicity loss time decreased with increasing conductivity and drop rate of electrolyte. Additionally, the hydrophobicity loss time with the dc voltage application was shorter than the with the ac voltage application. In the case of dc voltage application, the increase of drop rate was confirmed after impressing voltage. The increase of drop rate promoted the lowering of hydrophobicity; therefore the hydrophobicity loss time became shorter. The surface of the test sample has a greater opportunity to attach NaCl and keep electrification on the surface of SiR with the increase of drop rate.

Thus, we carried out an exposure test and a salt-fog test to clarify long-term reliability of polymeric housing materials, and we successfully showed the effectiveness of polymeric insulators and relationship between degradation and contamination. Our results contribute on the spread of polymeric hosing materials.

第1章 序論

1.1 はじめに

現在の私達の生活は電気に大きく依存しており、安定的且つ高品質な電気を継続的に供給することが求められている。この電力の安定供給に必要な不可欠な電力用設備の一つとして、屋外で使用するものとして電気絶縁機器を挙げることが出来る。電気絶縁機器には、塩害等の厳しい使用環境に耐える絶縁耐力と、風雪等の外力に耐える機械的強度が要求される⁽¹⁾。このような中、電気絶縁機器の使用年数が長くなっているものに関しては、絶縁材料の経年劣化による絶縁耐力の低下が懸念されている。

従来、電気絶縁機器の外被材料としては、主に磁器やガラスが使われてきた。これらは絶縁特性が良く、耐候性も優れている等の長所を持つ反面、重量があり、耐衝撃性が悪く、汚損時の耐電圧特性が大きく低下する等の短所がある。一方、ポリマー材料は軽量で機械的強度が大きく、耐汚損特性にも優れていることから欧米を中心に使用範囲が広がっている⁽²⁾。また、ポリマー材料は加工性が良く、形状の自由度も大きいため構造の合理化と低コスト化が可能である。さらに、軽量であることによる作業性の向上といった効果が期待されており⁽²⁾、国内においても、送配電システムのコンパクト化の観点から送配電用絶縁アームとして、またその柔軟性から電力用ケーブルやスペーサ等としてもその開発、適用が望まれている⁽³⁾。

ポリマー材料としては主に、ポリエチレン (polyethylene) やエポキシ樹脂 (epoxy resin)、エチレンビニルアセテート (EVA: ethylene vinyl acetate)、シリコーンゴム (SiR: silicone rubber) 等が用いられている。これらのポリマー材料は従来の磁器と比べて軽量・高強度であり、耐熱性にも優れている⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なかでもシリコーンゴムは、耐候性に優れ、自身の有する撥水性により、非常に優れた耐汚損特性を発揮する。さらに、外的ストレスによって一旦撥水性が失われても、シリコーンゴム内部の低分子量成分 (LMW : low molecular weight) が染み出し、撥水性を回復する特性を持っている⁽⁴⁾。また、ポリマー材料の開発初期においては、雨や霧等の湿潤と局部乾燥に伴うドライバンドアーク放電による熱で急激に劣化することがあったが、最近では、耐アーク・耐エロージョン・耐トラッキング特性の向上を目的とした充填剤として三水和アルミナ (ATH : alumina tri-hydrate) が用いられるようになり、より強い材料が開発されるようになった。

以上のような利点から日本でも、電気絶縁機器の外被材料としての適用研究が盛んになり、現在では、主に JR の電車線路等への適用が進められている。しかし、ポリマー材料の国内での使用実績はまだ浅く、その劣化機構の解明も不十分であることから、多くの電力会社で適用があまり進んでいない。そのため、ポリマー材料の長期絶縁特性の解明及び劣化診断法の確立が求められている⁽⁴⁾。

1.2 本研究の目的

屋外用電気絶縁機器の外被材としてのポリマー材料については、既に海外で豊富な使用実績があるものの、国内においては安全性や長期信頼性等の観点から、限定的な使用に留まっている。しかし、作業効率の向上等によるメリットが大きい設備については、着実に導入が拡大している⁽⁷⁾。

国内の電力会社におけるポリマー材料の適用例としては、相間スペーサ、避雷器容器、ケーブル終端接続部、開閉機器等の碍管が挙げられる。特に、相間スペーサと避雷器容器については、6 kV 配電用から 154 kV 送電用を中心に、急速に適用が拡大しており、一部 275 kV 送電用でも本格適用が開始されている。碍子についても 6 ～ 33 kV 配電用を中心に適用が開始されている⁽⁷⁾。

また、電車線路におけるポリマー碍子の本格適用は、電力輸送分野に比較して早く、既に多くの使用実績を有している⁽⁷⁾。1990 年代に入り、EVA を外被に用いたポリマー碍子のフィールド試験が JR 各社線路で開始され、その後、汚損が厳しく、雨による洗浄効果が期待できないトンネル内を始め、塩害地域についてまで適用が拡大されてきた。現在では、DC 1500 V の私鉄・地下鉄から AC 25 kV の新幹線に至るまで幅広く使用されている。また、一般の製造業においても、工場内の変電設備における全ての避雷器とケーブル終端接続部について、ポリマー碍子が適用されているという実績もある。

ポリマー材料は、前節で述べたような多くの利点を有しているが、有機物であるために経年による材料の変化は免れない。また、日本は湿度が高く、台風等の自然災害も頻繁に発生する。すなわち、ポリマー材料が比較的広く使用されている北米に比べ、日本での使用はポリマー材料にとって非常に過酷であると言える。そのため、ポリマー材料を国内の電気絶縁機器の外被材として適用するに当たり、材料の変質やそれに伴う劣化機構の解明と、長期的な絶縁特性の信頼性の把握が最重要課題となっている⁽²⁾。

本研究では、ポリマー材料の長期的な絶縁特性の変化を確認するため、まず、実環境にて曝露試験を実施した各種碍子に対して塩霧試験や STRI (Swedish Transmission Research Institute)法⁽⁸⁾による撥水性の評価、材料表面の組成分析等を行い、設置された環境によって材料や耐汚損特性へどのような影響を受けるかを明らかにすることとした。

次に、材料の劣化様相を確認するため、曝露試験において確認された材料表面への汚損物質の堆積が放電に与える影響の検討を行うことにした。さらに、交流及び直流課電の違いがポリマー材料の撥水性や絶縁特性へ及ぼす影響について明らかにすることとした。

以上の試験をとおして、ポリマー材料の長期的な絶縁特性の変化を確認するとともに、屋外用電気絶縁機器の外被材としてのポリマー材料の今後の機器設計、材料評価試験のための知見を得ることを目的とした。

1.3 本論文の概要と構成

本論文は、第1章から第6章で構成されている。第1章は序論であり、本研究の背景や屋外用電気絶縁機器の外被材の現状と課題、研究の目的について述べている。第2章では、屋外での曝露試験を環境の異なる複数個所で行った結果に基づいて、使用環境によるポリマー碍子への影響の検討結果を述べている。第3章では、EVAの板状試料表面の不溶性物質付着密度を指標として、汚損物質が試料表面に与える影響について述べている。第4章では、実線路で使用されたポリマー碍子の撤去品を用い、塩霧試験及び外被材料の組成分析、STRI法による撥水性の評価を行った上で碍子の劣化の有無と耐汚損特性との関係を検討している。第5章では、SiR系の板状試料を用いて行った塩霧試験について述べるとともに、実使用環境を考慮し汚損物質の違いによる電気量への影響の検討を行っている。また、直流課電と交流課電による絶縁特性への影響の違いを検討している。最後に、第6章では、本研究のまとめと今後の課題、及び展望について述べている。

第2章 ポリマー碍子の曝露試験

2.1 曝露試験の背景

長期的なポリマー材料の劣化は環境因子により変化するため、ポリマー絶縁機器の信頼性を判断する方法としては、実際の使用環境で長期間曝露（屋外曝露試験）することが最適である。しかし、屋外曝露試験の実施のみでは結果を得るまでに多くの時間と労力を費やすこと等の問題がある。そこで、曝露試験と同時に EdF (Electricite de France)試験⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や塩霧試験⁽¹¹⁾等の加速劣化試験を行い、それらの結果を比較する事により加速倍率を算出する。これをもとに、ポリマー絶縁機器の寿命を診断し、ポリマー材料の長期絶縁特性の信頼性を確認する。

本章では、実際に屋外で数年にわたり課電しながら屋外曝露試験を複数個所で実施した結果について述べる。この結果を基準とすることで、これまでに実施してきた加速劣化試験の加速倍率を算出することが出来る。

2.2 唐津での曝露試験

2.2.1 屋外曝露試験概要

屋外曝露試験は、佐賀県唐津市にて実施した。試験場の位置を図 2.1 に示す。また、図 2.2 に曝露試験場を、図 2.3 に課電回路をそれぞれ示す。試験場は絶縁機器を汚損し、絶縁強度を著しく低下させる海塩粒子の多い海岸線に近く、図 2.2 の正面方向から北東方向が海に面している。表 2.1 に試料概要を、表 2.2 に曝露試験の経過を示す。試料は全て 22 kV 級配電用碍子で ZnO 素子内蔵の避雷機能付 EVA 通り碍子、EVA 引き留め碍子、SiR 碍子、磁器碍子の 4 種類である。製造直後等の新しい状態では、ポリマー材料は磁器に比べ優れた汚損耐電圧特性を示すが、経年による変化が明確ではないため、沿面距離は磁器と同等の漏れ距離を保つように設計されている⁽¹⁶⁾。曝露試験槽の上にポリマー碍子を垂直に取り付け(EVA 引き留め碍子のみ横向きに設置)、定格の 13.3 kV を印加して漏れ電流を計測した。計測には、National Instrument 社の LabVIEW を用い、A/D 変換ボードを介して 2.4 kS/s で漏れ電流データを取得した。また、試験場は海に面していることに加え、近くには砂のグラウンドも存在するため、塩分と不溶性物質による複合汚損環境であり、比較的厳しい環境と考えられる。

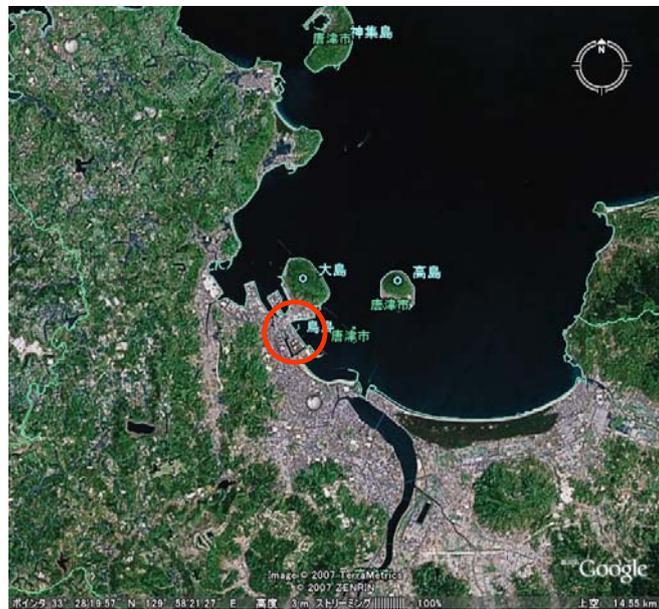


図 2.1 曝露試験場の位置⁽¹²⁾



図 2.2 曝露試験槽

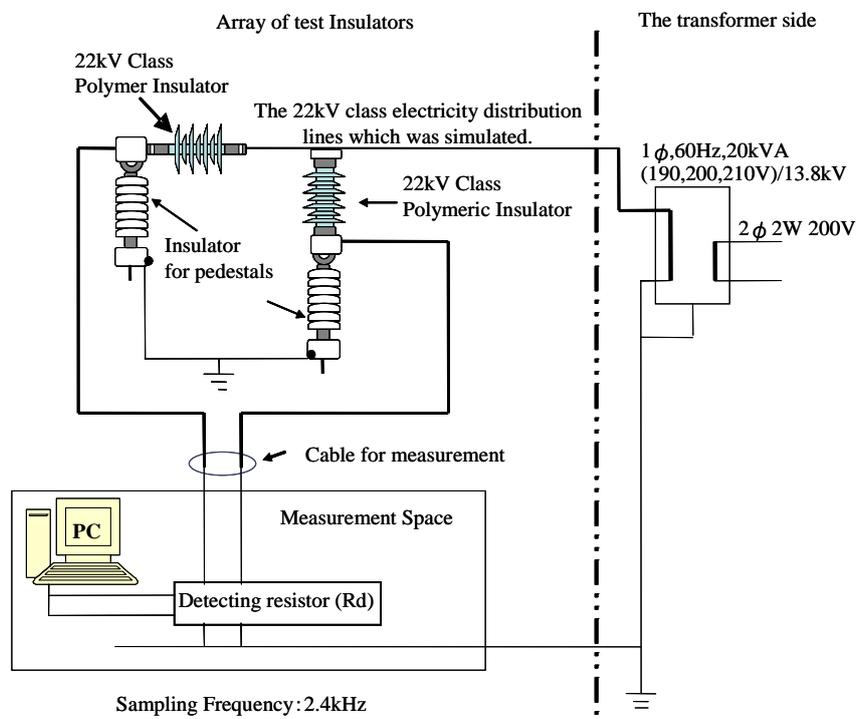


図 2.3 課電回路

表 2.1 試料の概要

Test sample	Creeping distance [mm]	Applied Electric field [V/mm]	Material	Exposure beginning month
1ch	840	15.8	EVA (LP)	2001.3
2ch	1014	13.1	EVA (anchor)	2001.3
3ch	950	14.0	SiR	2004.9
4ch	860	15.5	Porcelain	2004.9
Applied voltage	13.3 kV (The voltage is always applied.)			

表 2.2 試験経過

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
EVA (LP)	→				→		
EVA (anchor)	→				→		
SiR				→			
Porcelain				→			

 Exposure time
 Time of data acquisition

2.2.2 曝露試験結果

図 2.4 に、2004 年 10 月～2007 年 2 月の間の累積ドライバンドアーク放電電気量と 1 日毎の降水量を示す。気象データは、唐津情報都市推進協議会により唐津市役所屋上に設置してある小型地域気象観測システムにより測定されたものを用いている。

2.2.2.1 EVA 通り碍子

図 2.5～図 2.10 に、2006 年 10 月 24 日時点での曝露期間約 5 年 6 ヶ月の EVA 通り碍子の表面状態を示す。図 2.4 より、2004 年 10 月～2007 年 2 月の期間で EVA 通り碍子は 225 C のドライバンドアーク放電電気量となっていることが分かる。2004 年 10 月～2005 年 9 月まではほとんどドライバンドアーク放電は発生しなかったが、2005 年 9 月の台風以降 EVA 通り碍子と磁器碍子のドライバンドアーク放電電気量が急激に増えている。2005 年 9 月の時点で、曝露試験の開始から EVA 通り碍子は約 4 年 6 ヶ月、磁器碍子は約 1 年が経過している。EVA 通り碍子の電気量増加の要因としては、経年劣化の可能性が考えられるが、無機物であり劣化しない磁器碍子も同時に顕著なドライバンドアーク放電電気量の増加が見られるため、経年劣化よりも、外被表面に汚損物が堆積したことにより碍子表面の絶縁抵抗が低下したものと考えられる。そこで、図 2.5、図 2.7、図 2.9 より、碍子の上部、中部、下部の汚損状況を比較すると、雨洗効果が期待出来る碍子上部において汚損物の堆積が多いことが分かる。これは、上部金具部で、電力ケーブルと接合される部分を保護するために取り付けられたカバーが屋根のような働きをしたため、雨が降っても上部の汚損物は洗い流されずそのまま堆積を続けたことが原因である。

図 2.7 において、笠部間での放電が原因と考えられるトラッキング痕を確認できる。これは、台風等の過酷な環境で急速汚損に曝された際に、上笠から下笠へ水滴が落下する際に生じた強い放電によるものと考えられる。しかし、曝露試験を行った EVA 碍子は、漏れ電流が増加傾向にあるものの、その波高値は最大で数 10 mA 程度であることから、2007 年 2 月の時点では絶縁性能に支障はないと考えられる。

2005 年 9 月以前にも汚損物は堆積していたと考えられるが、2004 年 10 月～2005 年 9 月までの電気量から判断すると、ほとんどドライバンドアーク放電は発生していない。これは、EVA 碍子の外被表面に製造段階で離型剤として使用されているフッ素が優れた撥水性を有していたためであると考えられる。しかし、EVA 碍子を用いた人工環境複合劣化試験(EdF 試験)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾においても、試験時間の経過により急激な漏れ電流の増加を確認している。曝露試験の場合も EdF 試験と同様に、4 年半の曝露期間を経過して試料表面のフッ素による撥水性の消失や汚損物の堆積等により、2005 年 9 月の台風における急速汚損に曝されたことをきっかけに漏れ電流の増加が始まったと考えられる。また、図 2.6、図 2.8、図 2.10 に示すように、STRI 法⁽⁸⁾による撥水性の評価は HC7 であり、表面は完全に水膜で覆われている。(STRI

法の詳細は付録を参照のこと。)

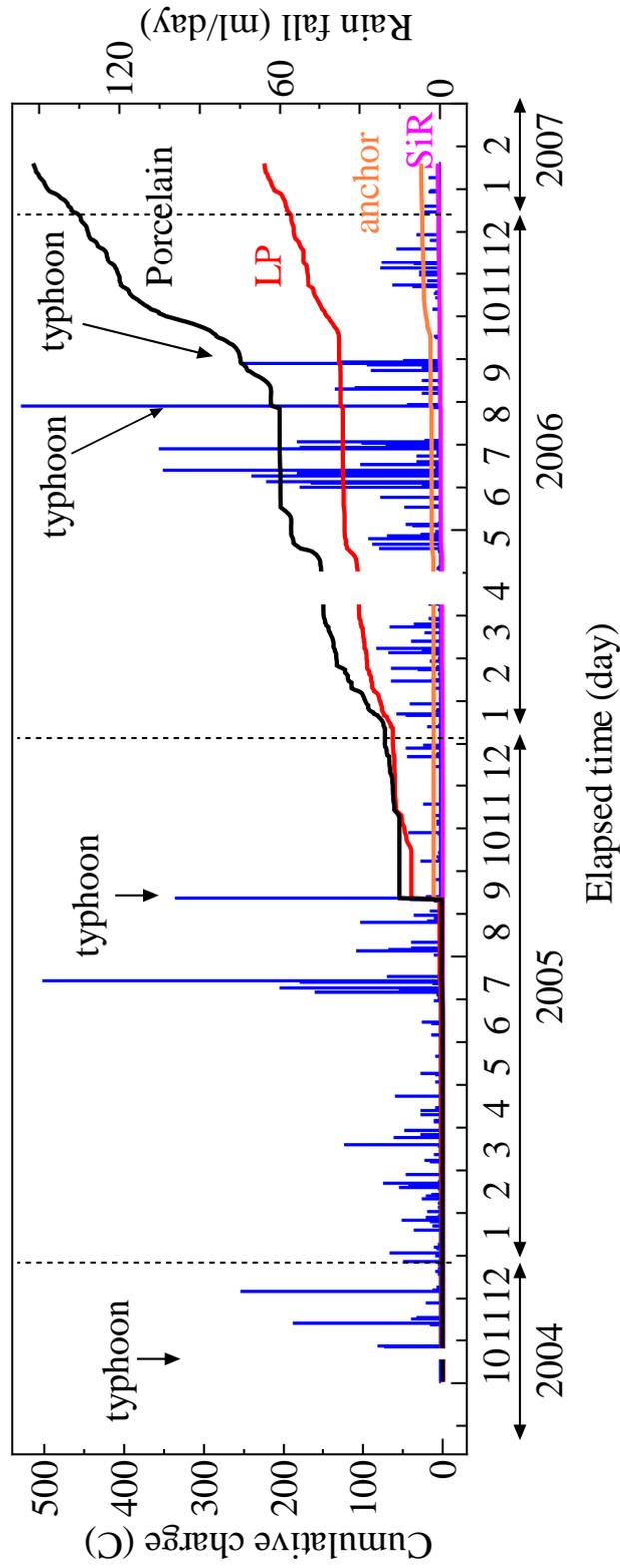


図 2.4 2004 年 10 月～2007 年 2 月の曝露試験結果 (ドライバインドアーク放電と一日の降水量との関係)



図 2.5 EVA 通り 碍子上部の表面状態(スプレー前)
笠部には全体的に汚損物が堆積している。



図 2.6 EVA 通り 碍子上部の表面状態(スプレー後)



図 2.7 EVA 通り 碍子中部の表面状態(スプレー前)

笠上面にトラッキング痕等のエロージョンが確認出来る。また、笠部全体に汚損物が堆積している。

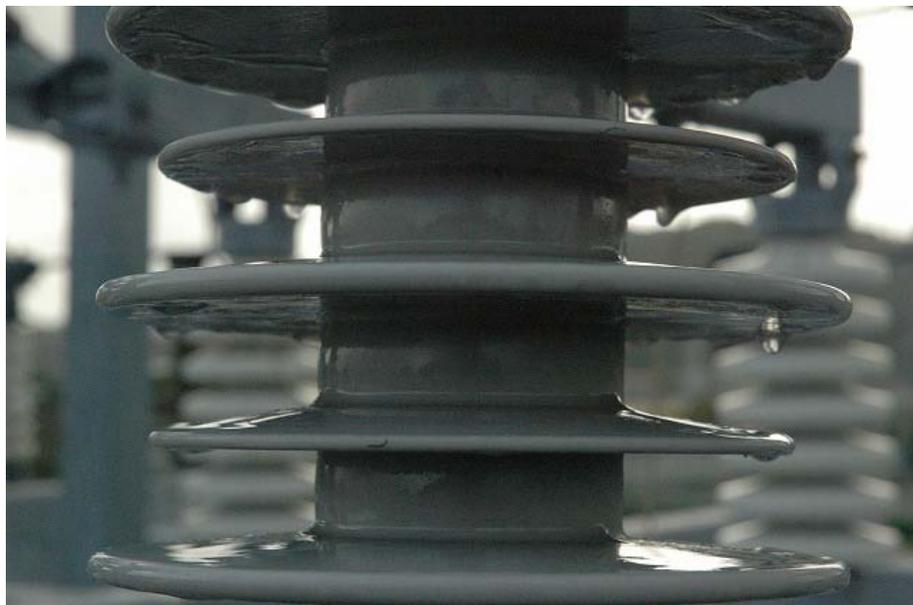


図 2.8 EVA 通り 碍子中部の表面状態(スプレー後)



図 2.9 EVA 通り 碍子下部の表面状態(スプレー前)
笠部全体に汚損物が堆積している。



図 2.10 EVA 通り 碍子下部の表面状態(スプレー後)

2.2.2.2 EVA 引き留め碍子

図 2.11 に、曝露時間約 5 年 6 ヶ月の EVA 引き留め碍子を示す。図 2.4 より、2004 年 10 月～2007 年 2 月の期間で EVA 引き留め碍子(2001 年 3 月曝露開始)は 27 C のドライバンドアーク放電電気量となっていることが分かる。EVA 通り碍子よりも累積ドライバンドアーク放電電気量は約 1/8 と少ない。この理由として、表 2.1 に示すように、EVA 引き留め碍子が EVA 通り碍子と比べて沿面距離が長いことや、横向きに設置しているため雨洗効果の影響が大きく汚損物が付着し難いこと等が考えられる。



図 2.11 EVA 引き留め碍子の表面状態

2.2.2.3 SiR 碍子

図 2.12～図 2.17 に、曝露時間約 2 年 1 ヶ月の SiR 通り碍子の表面状態を示す。図 2.4 より、2004 年 10 月～2007 年 2 月の期間で SiR 碍子は 6.2 C のドライバンドアーク放電電気量となっていることが分かる。これより、SiR 碍子は、EVA 碍子に比べてドライバンドアーク放電は発生していないことが分かる。その理由は、SiR 碍子の特徴である高い撥水性を有していることが大きく影響していると考えられる。そこで、SiR 碍子の表面状態を観察すると、図 2.12、図 2.14、図 2.16 に示すように、曝露時間約 2 年 1 ヶ月の SiR 碍子の表面状態は、最上部の笠にて鳥糞を、全体的には砂等で汚損された跡を確認する事ができた。

SiR 碍子に STRI 法を適用すると、最上部の笠は、海に面している側は水膜に覆われて完全に撥水性を失っている HC 7 であった(図 2.13)。SiR 碍子は、一度撥水性を失っても、低分子量成分の染み出しにより再び撥水性を回復するという特性を持っているが、撥水性が全く失われている部分が存在している

ため、この部分は、汚損物によって撥水性が失われているものと考えられる。しかし、中部や下部の笠や胴部では撥水性が認められており、まだ十分な絶縁性能を保有していると考えられる(図 2.15, 図 2.17)。STRI 法による撥水性評価は、最上部の笠で海側に面している部分は HC 7 で完全に水膜に覆われているが、海に面していない部分は HC 4~HC 5 であり、個別の水滴と、濡れた細路(水の流れた跡)の形成が見られる。しかし、中部や下部の笠の撥水性は HC 2~HC 3 程度であり、円形を留めていない水滴も確認する事が出来る。



図 2.12 SiR 碍子上部の表面状態(スプレー前)

最上段笠部に鳥糞の付着が見られる。また、笠部は全体的に汚損物が堆積している。



図 2.13 SiR 碍子上部の表面状態(スプレー後)



図 2.14 SiR 碍子中部の表面状態(スプレー前)
笠部に汚損物が堆積している。

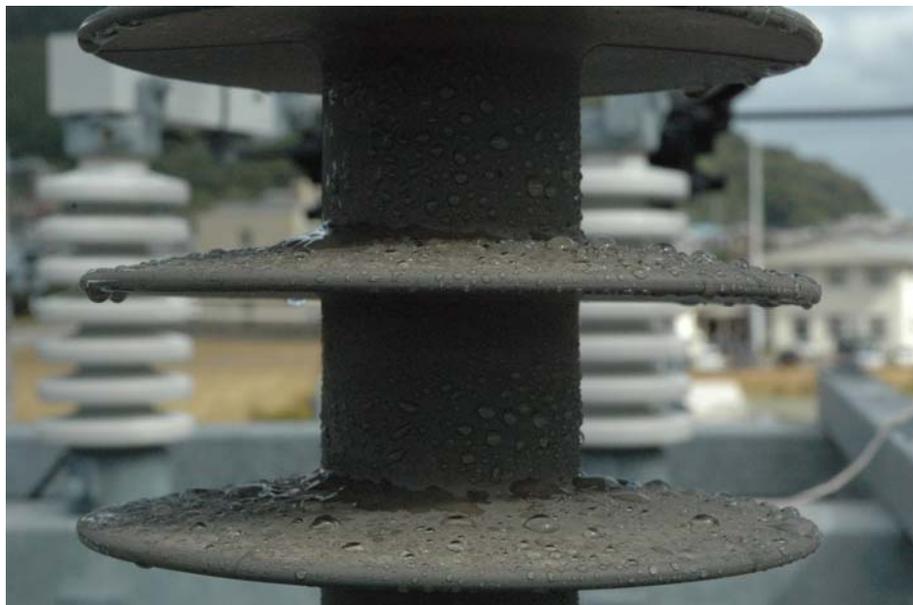


図 2.15 SiR 碍子中部の表面状態(スプレー後)



図 2.16 SiR 碍子下部の表面状態(スプレー前)
笠部全体に汚損物が堆積している。



図 2.17 SiR 碍子下部の表面状態(スプレー後)

2.2.2.4 磁器碍子

図 2.4 より、2004 年 10 月～2007 年 2 月の期間で磁器碍子は 514 C のドライバンドアーク放電電気量となったことが分かる。磁器碍子が白色であるため、光の反射が強すぎて、細かな汚損状況等の表面状態の観察は出来なかった。しかし、無機物であり劣化しない磁器碍子が、ポリマー材料と比較して十分大きな累積ドライバンドアーク放電電気量となっていることから、その表面状態は汚損物が多く堆積していることが予想される。また、磁器碍子には撥水性が無いので、STRI 法による撥水性評価では HC 7 で完全に水膜で覆われた。

2.2.2.5 累積ドライバンドアーク放電電気量の比較

EVA 通り碍子は 6 年、EVA 引き留め碍子は 4 年、SiR 碍子、磁器碍子は 2 年 5 ヶ月の曝露時間を経過しているが、計測期間は 2004 年 10 月～2007 年 2 月である。この期間で EVA 通り碍子は 225 C、EVA 引き留め碍子は 27 C、SiR 碍子は 6.2 C、磁器碍子は 514 C のドライバンドアーク放電電気量となった。EVA 通り碍子、磁器碍子で顕著なドライバンドアーク放電を観測した原因は、材料そのものに撥水性がほとんど無く、汚損物が堆積し、湿潤状態に曝されたことが挙げられる。EVA 引き留め碍子も、通り碍子同様に撥水性は無いが、横向きに設置していることから汚損物の堆積が少なかったことや、沿面距離が長いこと等から漏れ電流があまり流れなかったと考えられる。SiR 碍子に関しては、シリコーンゴム特有の優れた撥水性が失われる事無く存在しているため、漏れ電流は少ない結果となった。

2.3 宮崎大学構内での曝露試験

2.3.1 曝露試験概要

使用環境が異なることで、どのような影響を受けるかを調査するために、唐津の曝露試験場から撤去した碍子を宮崎大学構内の曝露試験用槽に設置し、屋外曝露試験を行った。図 2.18 に曝露試験用槽を示す。試験条件は、2.2 節で述べた唐津での曝露試験と同様である。試験には唐津の曝露試験において電気量の多かった表 2.1 中の EVA (LP)を用いた。また、宮崎大学構内は海から遠いため、唐津曝露試験場ほど厳しい環境ではないと言える。

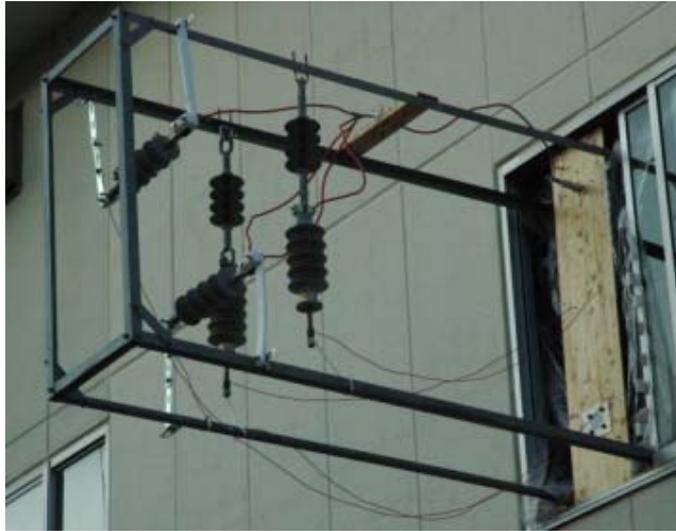


図 2.18 曝露試験槽

2.3.2 曝露試験結果

図 2.19 に、2008 年 1 月～2009 年 2 月の間の累積ドライバンドアーク放電電気量と 1 日毎の降水量を示す。気象データは、2008 年 7 月までは気象庁の宮崎県赤江観測所のデータを、2008 年 8 月以降は総合気象観測装置で測定したものをを用いている。なお、2008 年の夏季には台風が 3 度襲来したが、安全のため課電及び気象データの観測を中止し、曝露試験用槽を屋内に収納した。

図 2.19 より、試験を開始した 2008 年 1 月から 2009 年 2 月までの期間で約 55 C のドライバンドアーク放電電気量となったことが分かる。期間中降雨量にあまり関係なく電気量は増加を続けているが、唐津から撤去する直前の電気量の増加傾向に比べ緩やかになっている。また、大きく電気量が増加する傾向や、増加の傾向が大きくなること等が見られなかった。これは、宮崎大学が唐津に比べ緩やかな環境であることに加え、台風等の急速汚損の際に曝露していないことであまり大きな環境ストレスを受けていないことが原因であると考えられる。

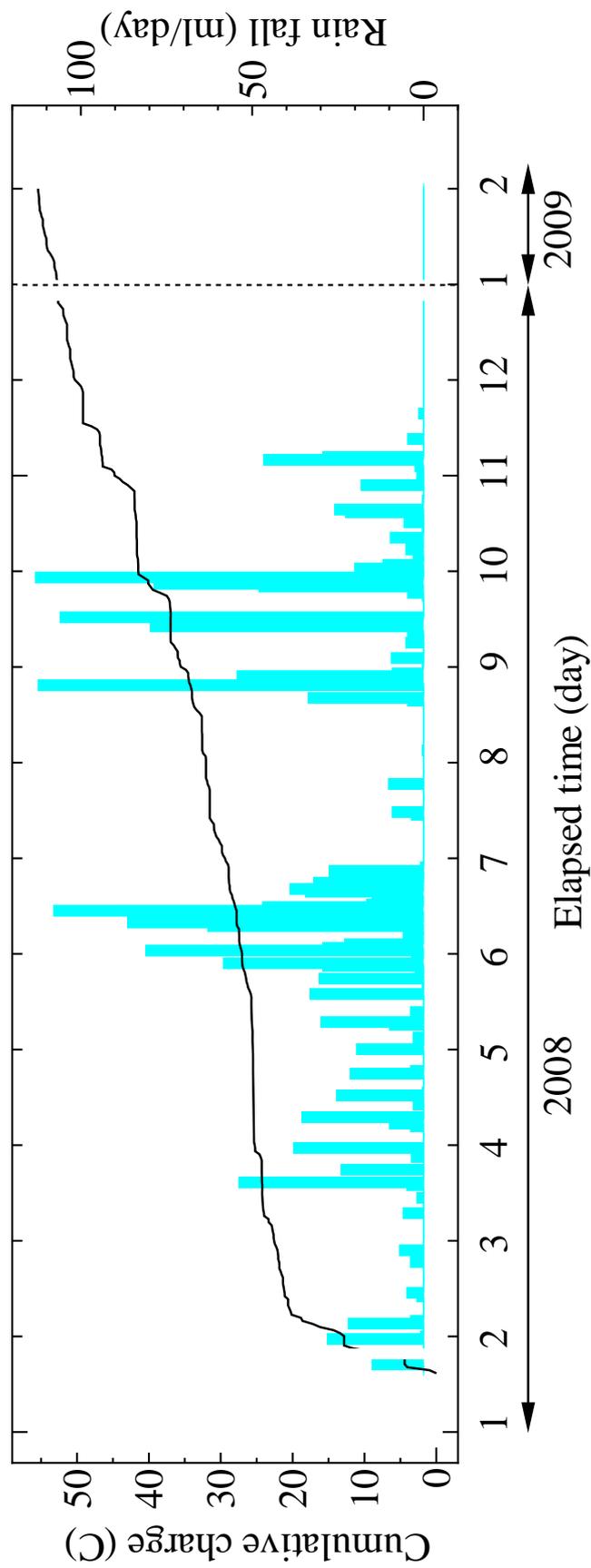


図 2.19 2008 年 1 月 ~ 2009 年 2 月の曝露試験結果 (ドライバインドアーク放電と一日の降水量との関係)

2.4 まとめ

ポリマー罫子を用いた曝露試験を重汚損地区と考えられる唐津及び軽汚損地区と考えられる宮崎大学の2箇所を実施した。その結果として、以下のような結果が得られた。

唐津での曝露試験では、2004年10月～2007年2月で曝露試験のデータを計測し、EVA通り罫子は225 C、EVA引き留め罫子は27 C、SiR罫子は6.2 C、磁器罫子は514 Cのドライバンドアーク放電成分の電気量となった。長期間の曝露により試料の表面に汚損物質が堆積し、EVA材料は離型剤のフッ素による撥水性が約4.5年で消失していた。このように、ドライバンドアーク放電成分の電気量が発生しているが、EVA罫子の漏れ電流は少なく、十分な絶縁性能を保持していると考えられる。また、SiR材料においても一部で撥水性が消失しており、ドライバンドアーク放電成分の電気量も発生しているが、継続的な電気量の増加も見られないことから十分な絶縁性能を保持していると考えられる。また、磁器罫子に比べ、EVA通り罫子では得られた累積電気量が少ないことから、沿面距離の短縮化を図ることが出来ると考えられる。

宮崎大学構内での曝露試験では、2008年1月～2009年2月で曝露試験のデータを計測し、EVA通り罫子で55 Cのドライバンドアーク放電成分の電気量となった。曝露環境が比較的緩やかになることで、ドライバンドアーク放電電気量の増加傾向も緩やかになることが分かった。このことから、重汚損地区において設置された罫子とその設置箇所において絶縁強度が低下した場合に、軽汚損地区へと設置箇所を変えることで再利用出来る可能性が示唆された。また、曝露試験で得た結果を加速劣化試験の結果と比較することで、加速劣化試験の加速倍率の算出が可能となる。

第3章 不溶性汚損物質がポリマー材料の電気的特性に与える影響の評価

3.1 はじめに

シリコーンゴム（SiR：silicone rubber）やエチレンビニルアセテート（EVA：ethylene vinyl acetate）等を用いたポリマー碍子は、従来使用されている磁器碍子と比べて安価・軽量・高強度で耐汚損特性に優れている。また、シリコーンゴムは優れた撥水性を有することから湿潤状態にあっても水膜を形成しにくく、高い絶縁特性を有するために日本でも電力系統への適用が検討されている。なお、ポリマー碍子の使用状況は、北米・欧州である程度の長期使用実績があるが不具合事例も報告されており、日本国内においては実際の環境での使用実績がほとんど無い。ポリマー材料は有機物であるため紫外線、酸性雨、昼夜間の温度変化や試料表面上で発生する各種放電等により経年劣化することが懸念されており、環境条件によってはコロナ放電や局部アーク放電（ドライバンドアーク放電）による絶縁特性の低下が危惧されている。特に、汚損湿潤時の局部乾燥帯（ドライバンド）を橋絡するドライバンドアーク放電は高温となり、材料劣化への影響が大きいと考えられる。そのため、詳細な放電形態の検討等によるポリマー碍子の長期絶縁特性の解明および劣化診断法の確立が求められている⁽²⁾⁽⁴⁾。

3.2 汚損湿潤試験

長期的な外被劣化は環境ストレスにより変化するため、ポリマー碍子の信頼性を判断する方法としては、実際に適用する環境で長期間曝露（屋外曝露試験）することが最適である。しかし、長期間曝露には結果を得るまでに多くの時間と労力を費やす等の問題がある。そこで EdF 試験⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や塩霧試験⁽¹¹⁾等の比較的短時間で実施することの出来る加速劣化試験を行い、曝露試験の結果との比較結果に基づいて加速倍率を算出することでポリマー碍子の余寿命診断を行ってきた。2章で述べたように、一定期間の曝露試験に適用したポリマー碍子ではポリマー材料の表面に汚損物が堆積することで、試料の撥水性が消失することが確認された。しかし、これまでの加速劣化試験では試料表面の撥水性はあまり低下しておらず、試験後の試料表面の撥水性において顕著な違いが確認された。そこで本節では、加速劣化試験で考慮していない不溶性物質付着密度が電気的特性に及ぼす影響を汚損湿潤試験により評価した。

3.2.1 汚損湿潤試験方法

図 3.1 と表 3.1 に、汚損湿潤試験回路と試験条件をそれぞれ示す。試験は 1 m × 1 m × 1 m の試験容器内で実施した。試料には EVA 試料を用いた。試料の汚損は大気中の塵埃を模擬したとの粉を用いて行い、不溶性物質付着密度（non-soluble deposit density: NSDD）を指標として、汚損を施さない 0 mg/cm²、

0.5 mg/cm², 1 mg/cm², 3 mg/cm², 5 mg/cm², 7 mg/cm², 10 mg/cm², 20 mg/cm²に設定した。それぞれの NSDD に設定した試料の表面状態を図 3.2 に示す。新品の EVA 試料は離型剤であるフッ素により撥水性が強いので、定量的汚損を施す前に撥水性除去作業を行った。撥水性除去工程を以下に示す。

- ①との粉 1.5 : 水 1 の分量で混ぜたとの粉混濁液を磚子表面に塗布し、24 時間乾燥させる。
- ②乾燥させた磚子を水に浸し、24 時間放置する。
- ③磚子表面に付着したとの粉をコンプレッサーで洗い流す。

図 3.3 に示すように、1 回では撥水性を完全に除去できなかったため、上記の撥水性除去工程をさらにもう 1 回繰り返した。なお、汚損を施した試料は大地に対し垂直に設置した。

試験電圧は 4.8 kVrms とし、電極間距離を 80 mm に設定した試料表面の平均電界強度が 60 V/mm になるようにした。試験中は常時課電するとともに、イオン交換水を噴霧割合 0.6 l/h で噴霧できるようにした。試験時間は、イオン交換水の 12 時間の連続噴霧及び 12 時間の乾燥を 1 サイクルとし、2 サイクルの 48 時間とした。この間の漏れ電流波高値及び電気量を微分法⁽¹⁴⁾により評価した。

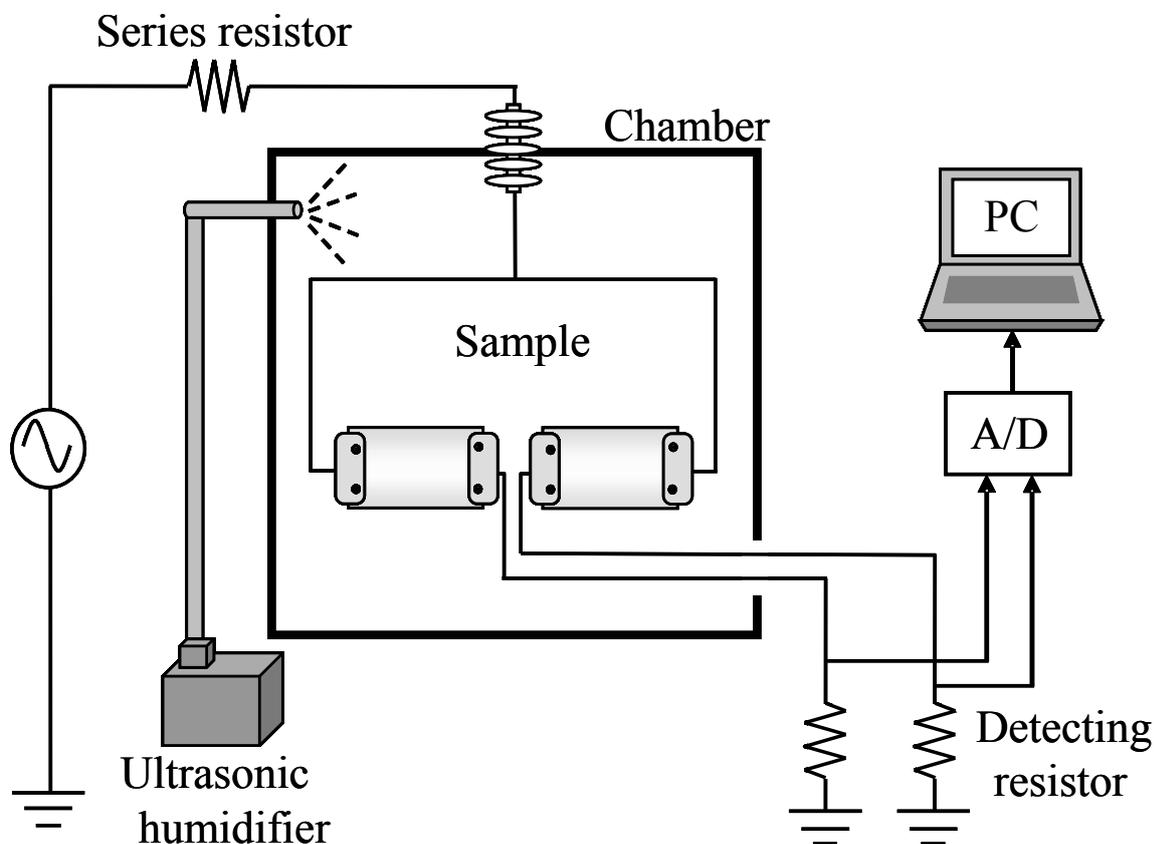


図 3.1 汚損湿潤試験回路

表 3.1 試験条件

Test time [h]	48
Applied voltage [kVrms]	4.8
Series resistor [kΩ]	10
Detection resistor [Ω]	100
Sample	EVA
Sample size [mm × mm × mm]	40 × 100 × 6
Gap length [mm]	80
Chamber size [m × m × m]	1 × 1 × 1
Spray rate [ℓ/hour]	0.6
Test liquid	Deionized water

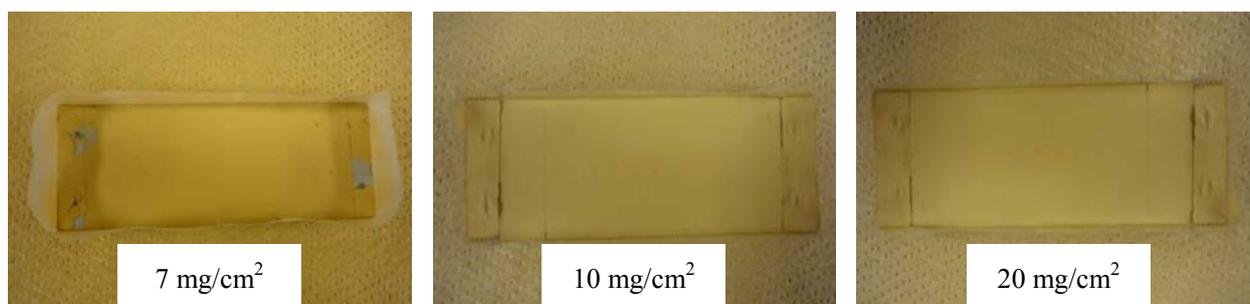
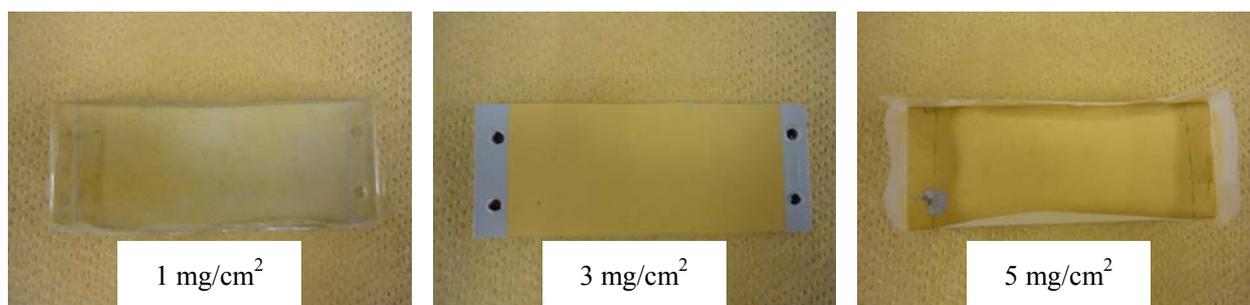
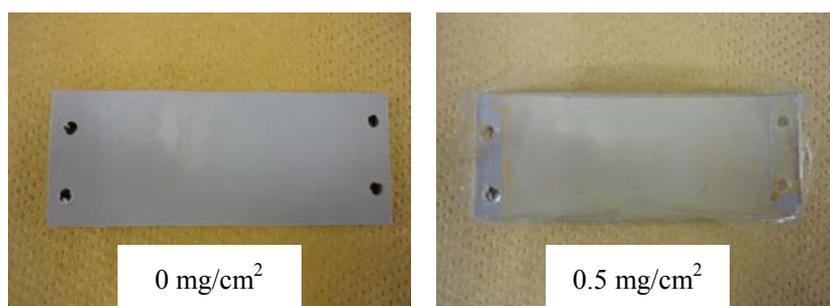
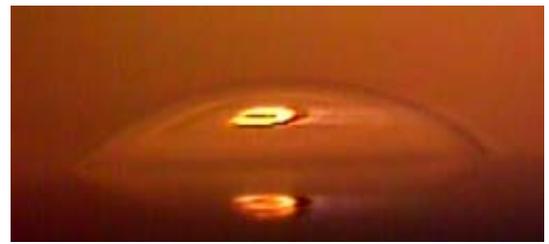


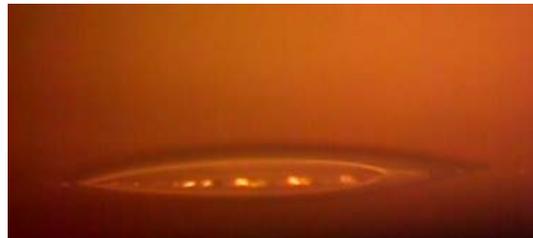
図 3.2 汚損試料



(a) 未使用



(b) 1回目



(c) 2回目

図 3.3 処理に伴う撥水性の変化

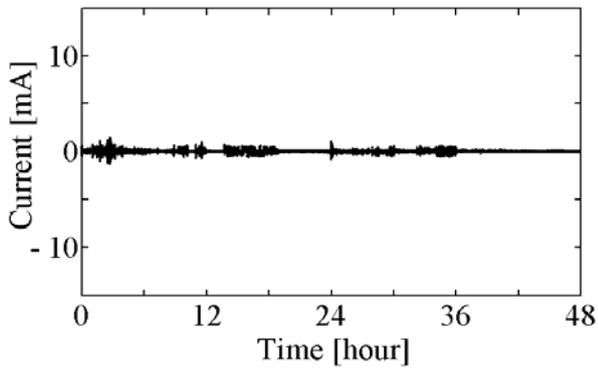
3.2.2 試験結果

汚損湿潤試験での各 NSDD における漏れ電流波高値の時間変化を図 3.4 に示す。同図は全て噴霧過程からデータが始まっている。同図から、全ての NSDD において、漏れ電流波高値は噴霧過程で増加し、乾燥過程では減少していることが分かる。また、噴霧が始まった直後に大きな波高値が得られることが多かった。噴霧によって十分な水分が供給されることで試料表面に漏れ電流が流れ、乾燥帯の形成、乾燥帯での放電が頻繁に起こったと考えられる。さらに、NSDD が大きくなると同じ噴霧中でも前半と後半で漏れ電流波高値の様相が異なることが分かる。これは、前半の噴霧や噴霧に伴って起こる放電等によって、試料表面に施された汚損物質が流れ落ちたため、後半の噴霧過程においては異なる NSDD となっていたことが原因である。

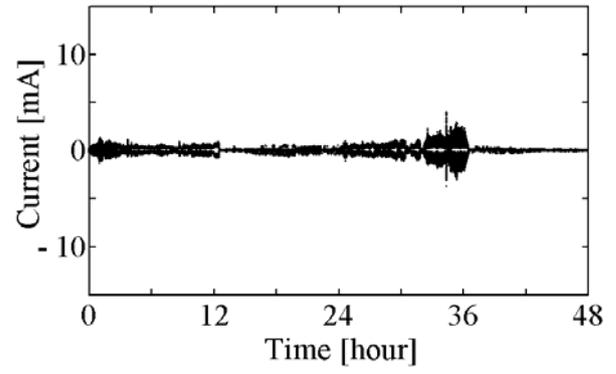
図 3.5 に各 NSDD における累積電気量の時間変化を示す。青線が導電性電流成分の電気量を、赤線がドライバンドアーク放電成分の電気量を示している。同図から、ドライバンドアーク放電成分の電気量は乾燥過程でほとんど変化していないことが分かる。それに対して、導電性電流成分の電気量は乾燥過程でも変化していることが分かる。また、NSDD が大きくなるにつれ、乾燥過程での導電性電流成分の電気量の変化量が大きくなっていることが分かる。これは、NSDD が大きくなると、試料表面の汚損物質が多くなり、噴霧が終了した時点での試料表面の汚損物質が吸収している水分量が多くなったと考えられる。

図 3.6 に各 NSDD における累積電気量を示す。同図から、導電性電流成分、ドライバンドアーク放電成分の累積電気量は 5 mg/cm^2 の場合を除き、NSDD の増加に伴い増加していることが分かる。NSDD が

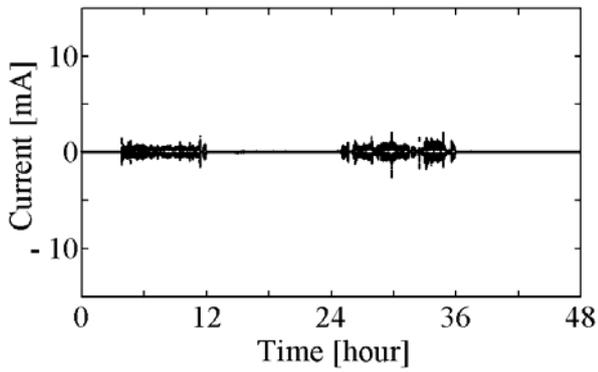
大きくなると汚損物質が増加するため、吸収する水分量も増え、累積電気量が増加したと考えられる。



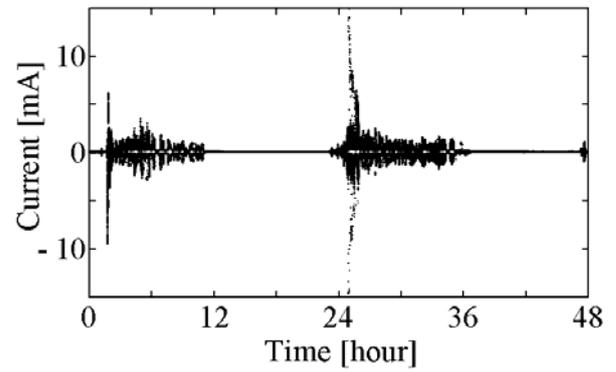
(a) 0 mg/cm²



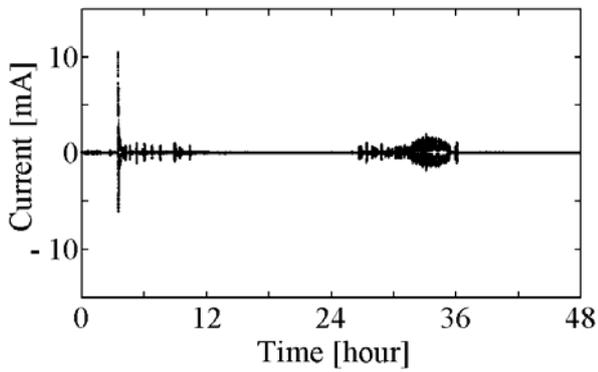
(b) 0.5 mg/cm²



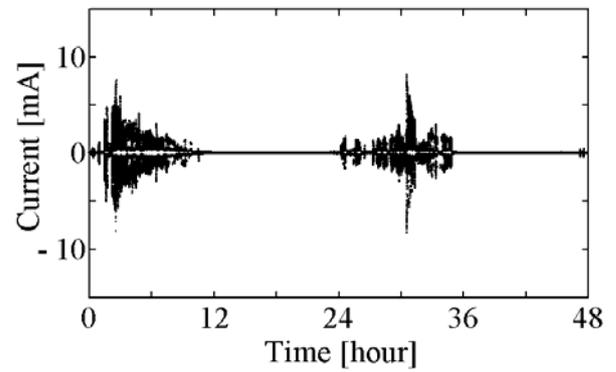
(c) 1 mg/cm²



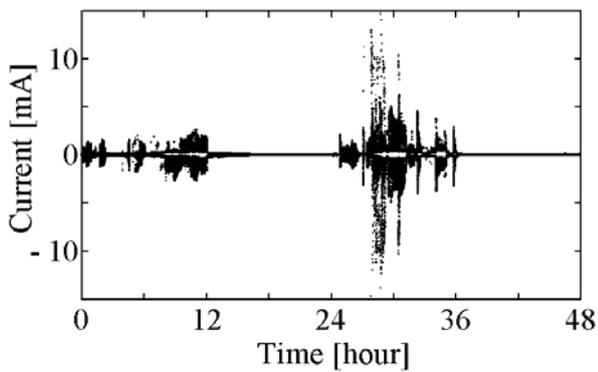
(d) 3 mg/cm²



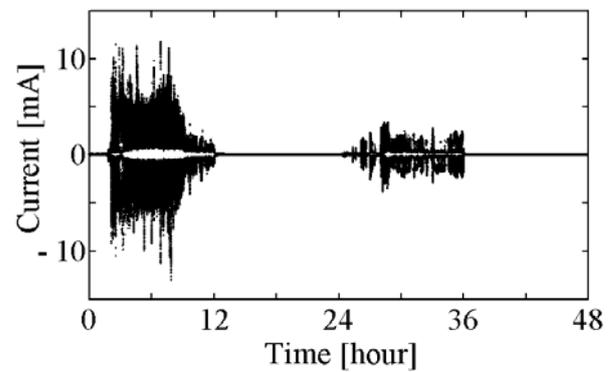
(e) 5 mg/cm²



(f) 7 mg/cm²



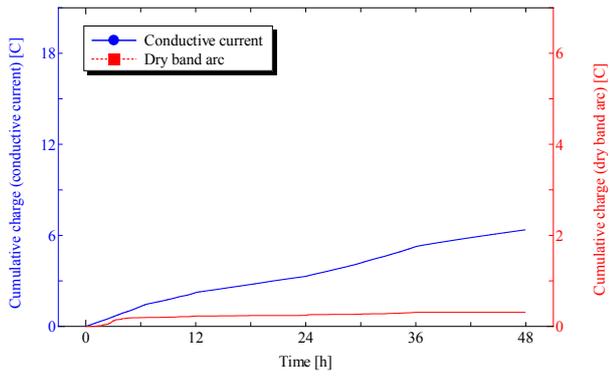
(g) 10 mg/cm²



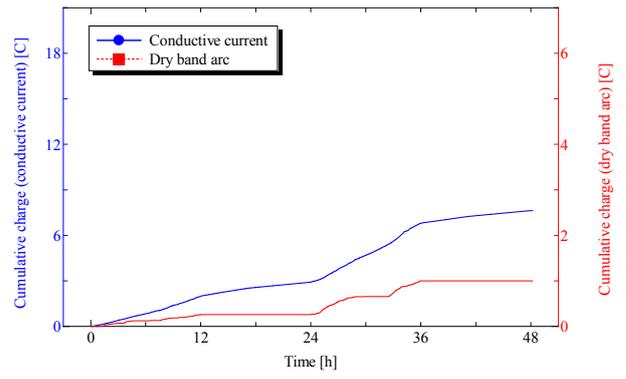
(h) 20 mg/cm²

図 3.4 各 NSDD における波高値の時間変化

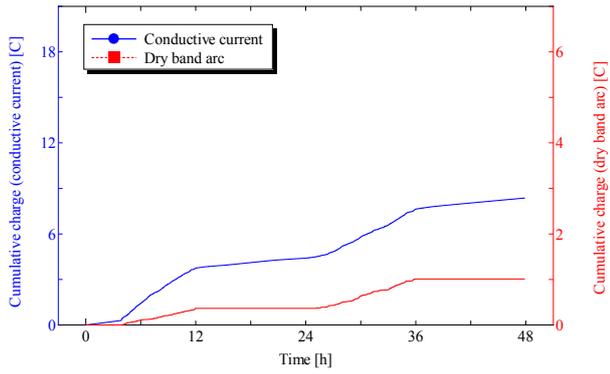
0-12, 24-36 : 噴霧過程, 12-24, 36-48 : 乾燥過程



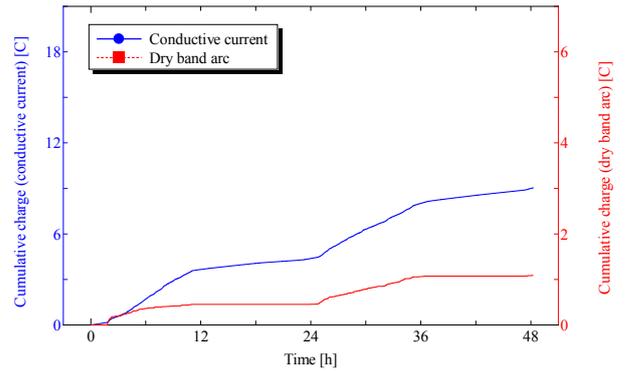
(a) 0 mg/cm^2



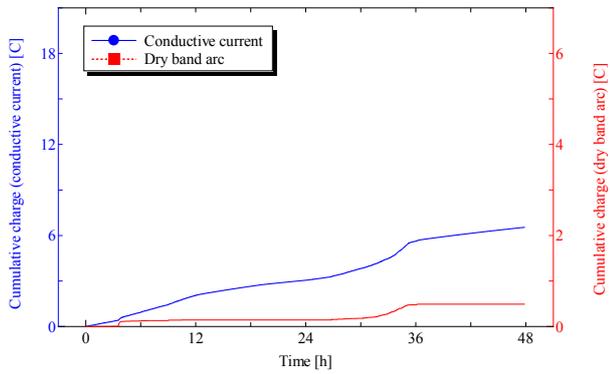
(b) 0.5 mg/cm^2



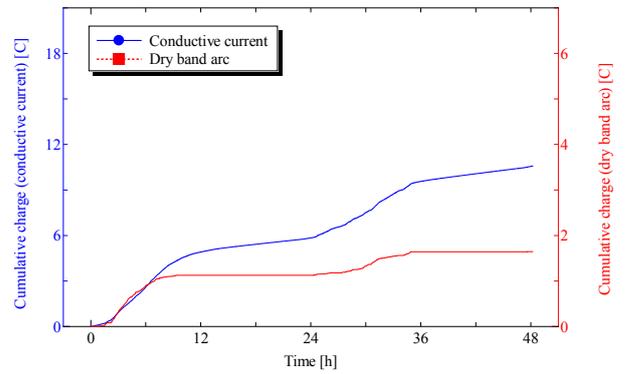
(c) 1 mg/cm^2



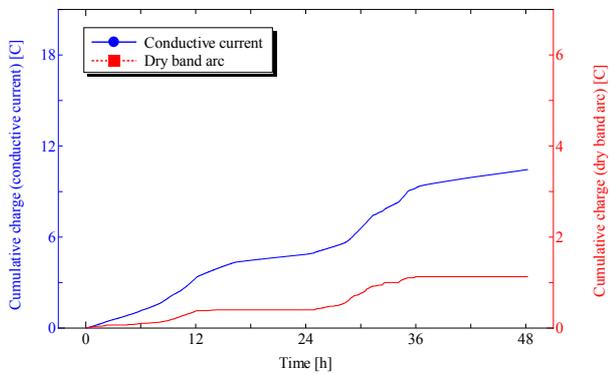
(d) 3 mg/cm^2



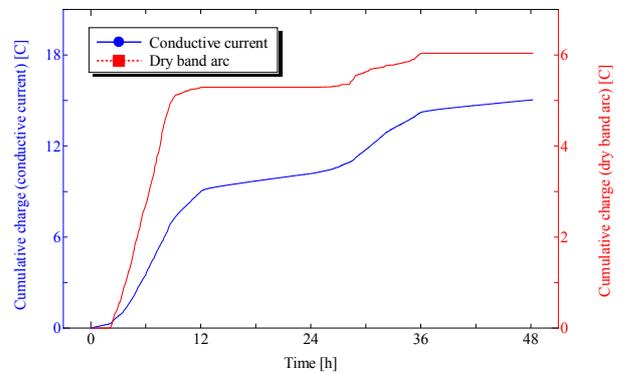
(e) 5 mg/cm^2



(f) 7 mg/cm^2



(g) 10 mg/cm^2



(h) 20 mg/cm^2

図 3.5 各 NSDD における累積電気量の時間変化

0-12, 24-36 : 噴霧過程, 12-24, 36-48 : 乾燥過程

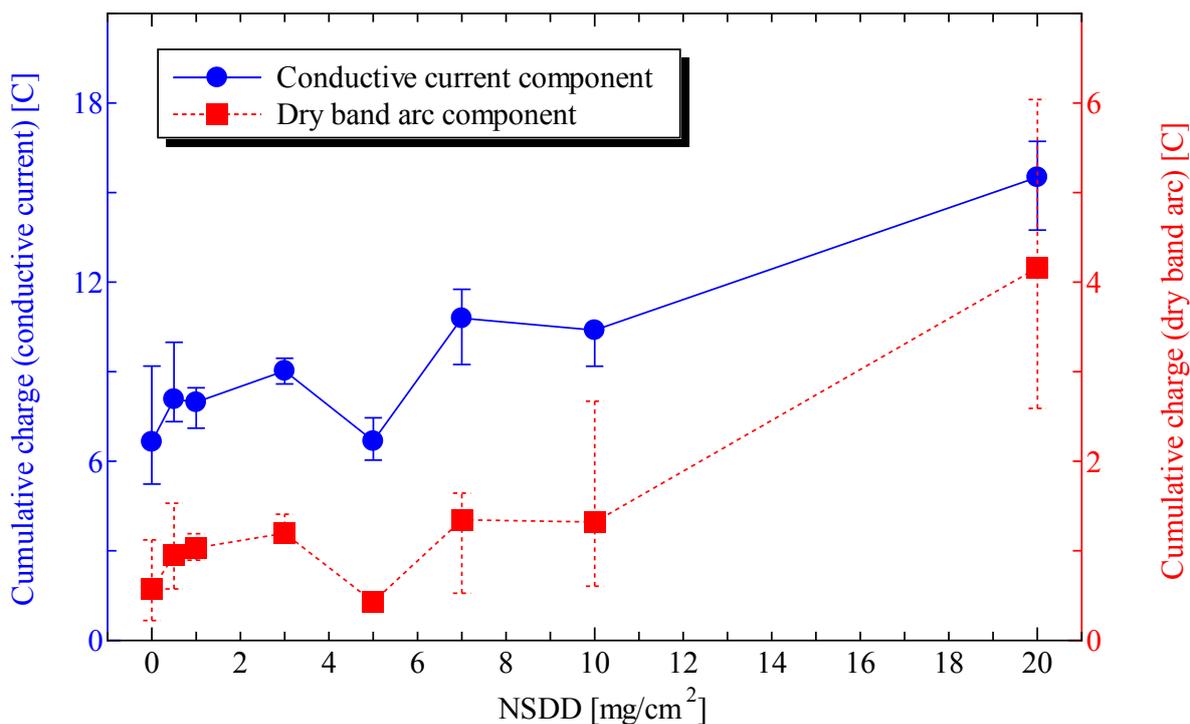


図 3.6 累積電気量

3.3 表面汚損物質が試料に与える影響の検討

3.2 節で述べたように汚損湿潤試験において、NSDD 5 mg/cm² の場合に前後に比べて累積電気量が異常に低い点が見られた。そのため、表面汚損物質が試料表面に与える影響を確認するため、以下の検討を行った。

3.3.1 水分の吸着状態

各 NSDD での水分吸着を調べるため、NSDD を 0 mg/cm²、1 mg/cm²、10 mg/cm² に設定した試料で、各 NSDD における表面温度の時間変化の比較を行った。試験電圧は 4.8 kVrms とし、イオン交換水を 0.6 ℓ/h の割合で 12 時間噴霧し、その後 1 時間乾燥させ、併せて 13 時間実施した。試料の表面温度はサーモグラフィを用いて計測した。図 3.7 に、各 NSDD における試料表面の温度の時間変化を示す。NSDD が大きい試料ほど、試験中の試料表面温度は高い温度まで上昇した。NSDD が大きいほど試料表面に堆積している汚損物が多くなることで吸収する水分量は増える。これに伴って、漏れ電流によるジュール熱が増加する。また、水分が多いことで乾燥帯も出来にくいため、温度の増加が長時間継続していると考えられる。

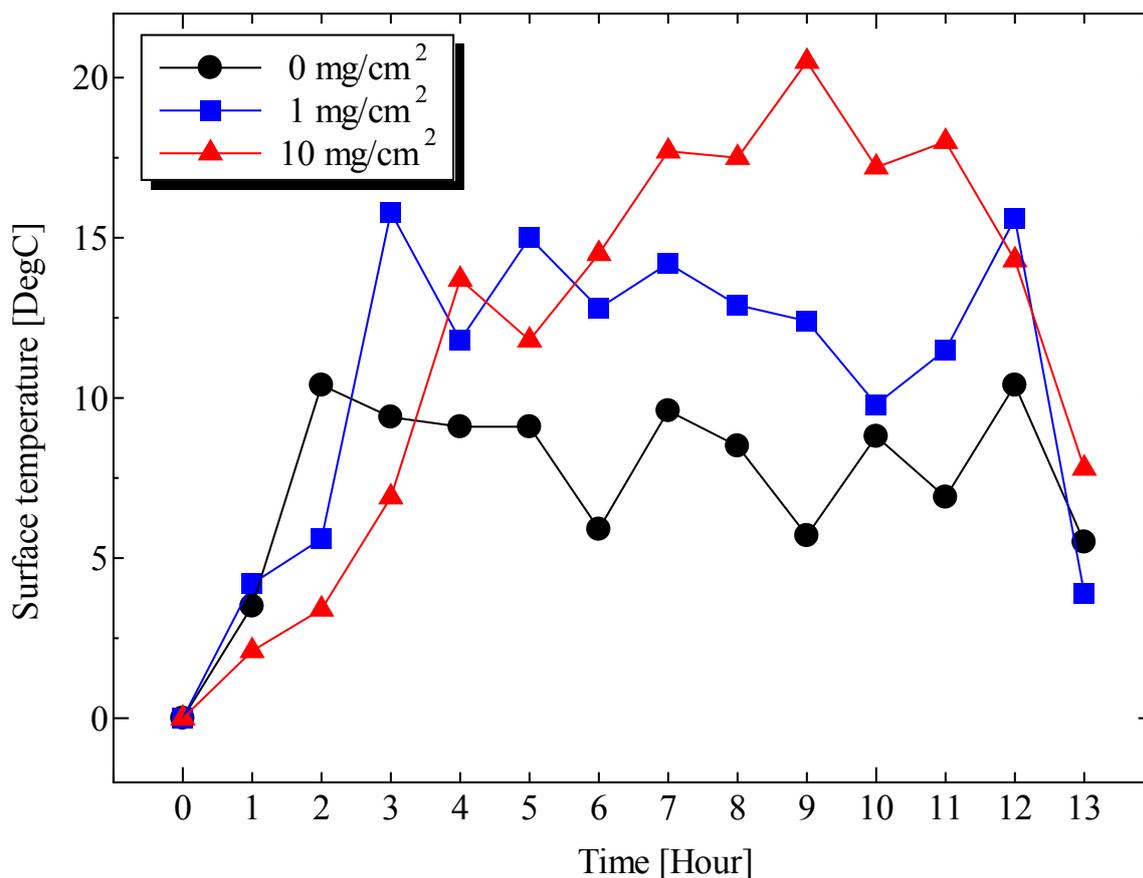


図 3.7 各 NSDD による試料表面温度の時間変化

3.3.2 ギャップの影響

図 3.8 に汚損湿潤試験の累積電気量と放電の発生頻度を示す。同図より、累積放電電気量は NSDD の増加に伴い概ね増加する傾向を示したが、放電の発生頻度は NSDD が低い場合にも高くなることが分かる。噴霧過程では、図 3.9 に示すように試料表面に施した汚損物質が流れ落ちる。NSDD が大きい場合には、汚損物質が多少流れ落ちても試料表面が露出することは少ないが、NSDD が小さい場合には汚損物質が除去される部分（汚損ギャップ）が出来ることが分かる。この汚損ギャップが放電に与える影響を検討した。

試験電圧は 4.8 kVrms とし、1 m × 1 m × 1 m の試験容器内にイオン交換水を 0.6 l/h の割合で噴霧しながら 3 時間の試験を実施した。NSDD を 1 mg/cm²、5 mg/cm² に設定した試料と、図 3.10 に示すようなあらかじめ汚損ギャップを施した試料の 2 種類の試料に対して、漏れ電流のドライバンドアーク放電累積電気量の及び放電の発生頻度の比較を行った。図 3.11 に汚損ギャップでの放電の様子を示す。また、汚損ギャップの有無による電気的特性の差異をまとめたものを図 3.12 に示す。図 3.11 において、試料表面の汚損物質が湿潤した場合には汚損ギャップに放電が集中することが分かる。また、図 3.12 において、NSDD 1 mg/cm² では汚損ギャップを施しても累積電気量や放電の発生頻度に大きな違いは見ら

れない。しかし、図 3.8 でドライバンドアーク放電電気量、放電の発生頻度ともに小さな値を示している NSDD 5 mg/cm^2 では、汚損ギャップを施したことにより、ドライバンドアーク放電電気量、放電の発生頻度がともに大きく増加したことが分かる。NSDD 1 mg/cm^2 では、汚損ギャップを施さなくても噴霧によって汚損ギャップが多数出来るために累積電気量や放電の発生頻度にあまり違いが見られなかったと考えられる。

以上のことから、NSDD が小さい場合に試料表面で発生する汚損ギャップは、ドライバンドアーク放電の発生頻度に大きく影響を与えることが分かる。また、NSDD が大きい場合の汚損試験においては汚損ギャップがほとんど発生していないことが考えられる。

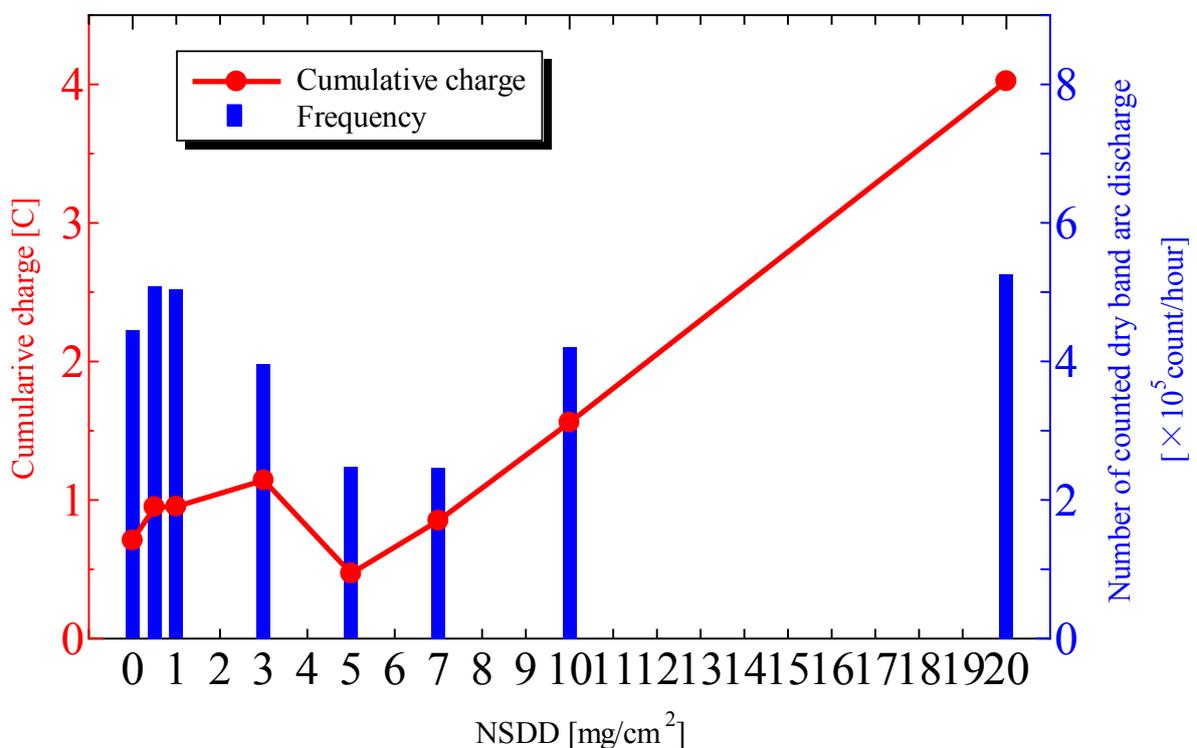
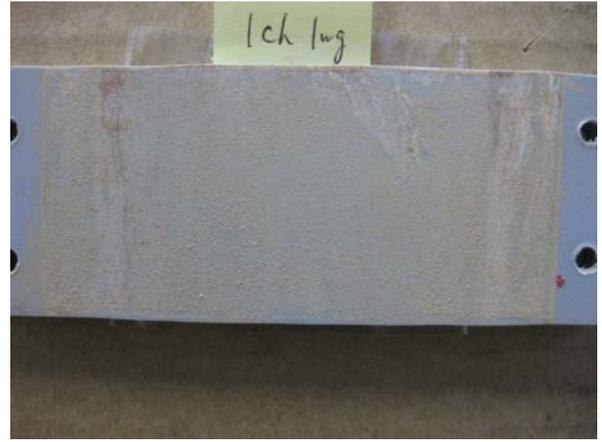


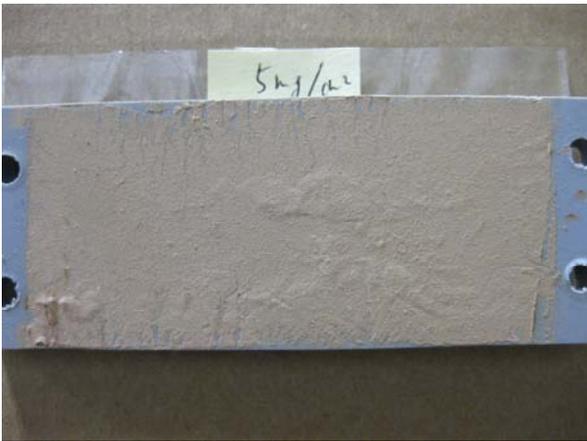
図 3.8 各 NSDD における累積電気量と放電の発生頻度



(a) 0.5 mg/cm^2



(b) 1 mg/cm^2



(c) 5 mg/cm^2



(d) 10 mg/cm^2

図 3.9 試験後の試料表面



図 3.10 汚損ギャップ

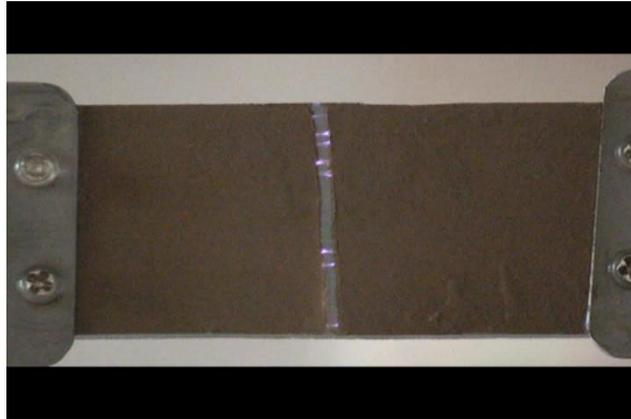


図 3.11 汚損ギャップでの放電（オレンジの部分がアーク放電）

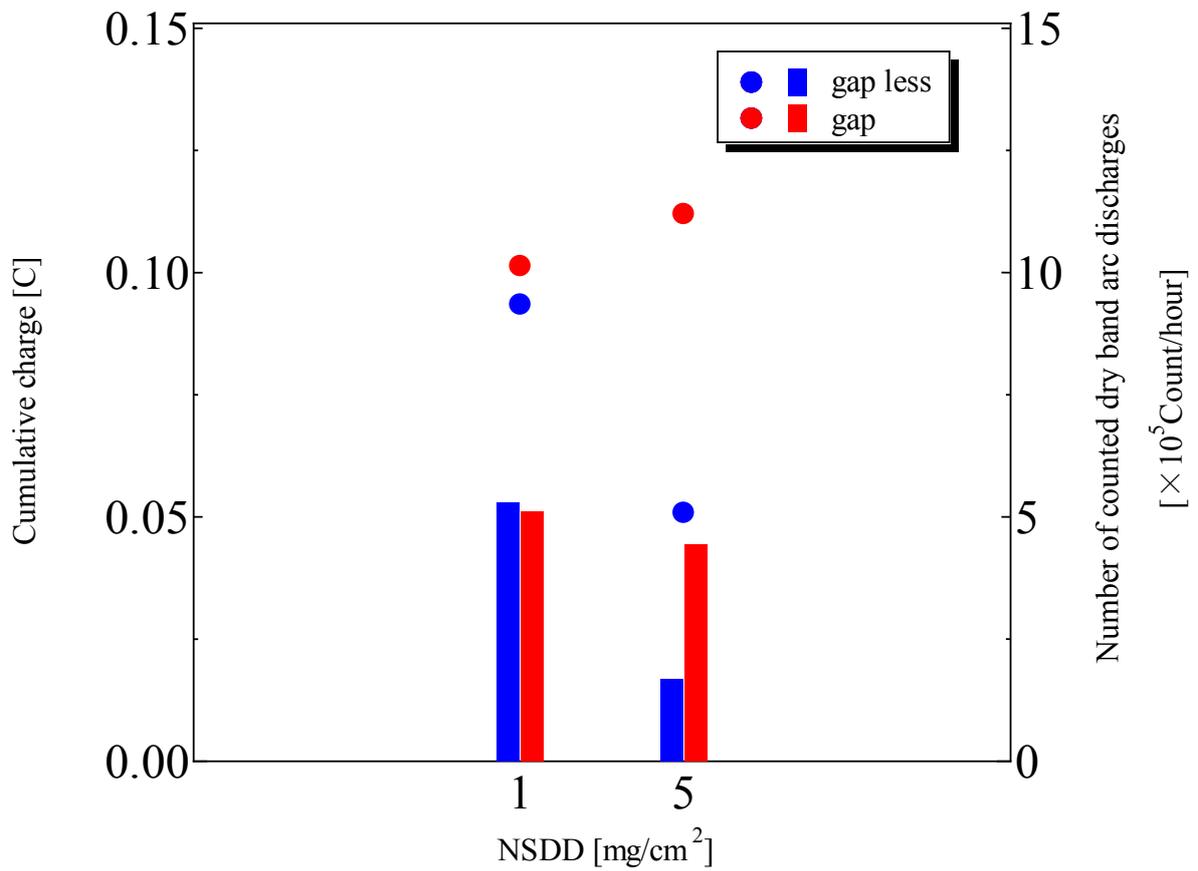


図 3.12 汚損ギャップの有無が累積放電電気量と放電の発生頻度に与える影響

(● ●: 累積放電電気量, ■ ■: 放電の発生頻度)

3.4 複合汚損試験

前節までに述べたように、ポリマー材料の劣化に大きく寄与するドライバンドアーク放電は試料表面の等価塩分付着密度 (equivalent salt deposit density: ESDD) や不溶性物質付着密度 (NSDD) で示される汚損物質によって影響を受けることが分かった。本節では、実環境を模擬し不溶性の汚損物により定量的汚損を施したポリマー材料に対して導電性を持つ霧を噴霧する複合汚損試験を行った。

3.4.1 複合汚損試験方法

複合汚損試験は、3.2 節で述べた汚損湿潤試験において、噴霧するイオン交換水に塩化ナトリウム (NaCl) を溶かして実施したものである。すなわち、表 3.2 に試験条件を示すが、試験供給水とその導電率、NSDD 以外の条件は 3.2 節で述べたものと同様である。

エロージョン試験における試料の損耗量の時間変化を図 3.13 に示す。エロージョン試験は、各導電率に設定した電解液をガラスろ紙に含ませ、放電波高値を 10mA に設定したアーク放電に曝した際の放電前後の試料の質量差から損耗量を算出したものである。試験試料には EVA を用いている。同図から、高い導電率の 8 mS/cm や 16 mS/cm に比べ、導電率が低い 4 mS/cm の場合に最も試料の損耗量が大きいことが分かる。この結果から、噴霧する電解液の導電率を 4 mS/cm と設定した。なお、NSDD は 0 mg/cm², 1 mg/cm², 3 mg/cm², 5 mg/cm², 7 mg/cm², 10 mg/cm², 15 mg/cm², 20 mg/cm² と設定した。試験中の漏れ電流波高値及び電気量を 3.2 節の汚損湿潤試験と同様に微分法により評価した。

表 3.2 試験条件

Test time [h]	48
Applied voltage [kVrms]	4.8
Series resistor [kΩ]	10
Detection resistor [Ω]	100
Sample	EVA
Sample size [mm × mm × mm]	40 × 100 × 6
Gap length [mm]	80
Chamber size [m × m × m]	1 × 1 × 1
Spray rate [ℓ/hour]	0.6
Test liquid	Deionized water with NaCl
Conductivity [mS/cm]	4

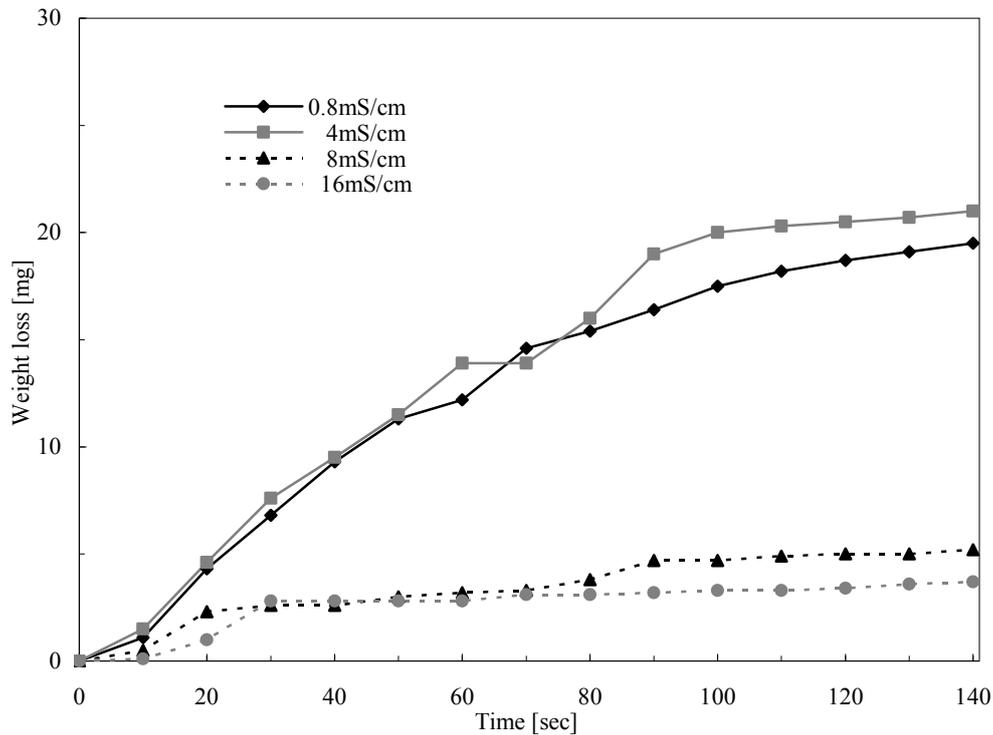


図 3.13 エロージョン試験における試料の損耗量の時間変化（試験試料は EVA）

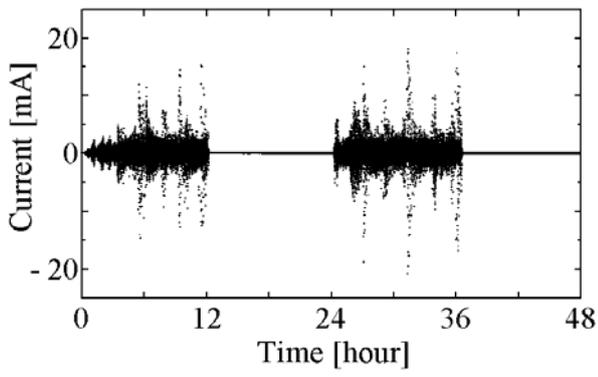
3.4.2 試験結果

複合汚損試験での各 NSDD における漏れ電流波高値の時間変化を図 3.14 に示す。同図から、全ての NSDD において、漏れ電流波高値は噴霧過程で増加し、乾燥過程では非常に小さいことが分かる。また、汚損を施していない 0 mg/cm^2 の場合にも、導電性を持つ霧を噴霧することで放電が発生していることが分かる。さらに、どの NSDD においても噴霧過程において 5 mA 程度の波高値が観測されている。また、NSDD が 10 mg/cm^2 , 15 mg/cm^2 の場合には、 20 mA を超えるような大きな放電も比較的頻繁に発生していることが分かる。

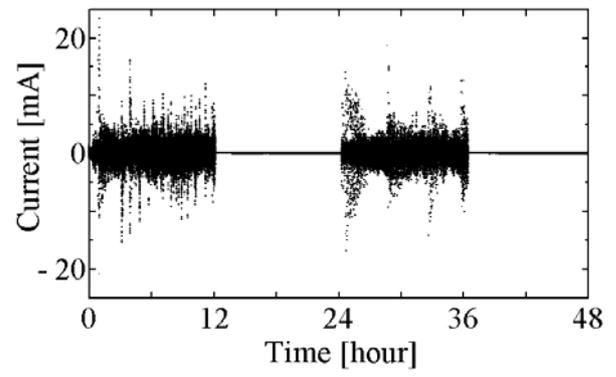
図 3.15 に各 NSDD における累積電気量の時間変化を示す。同図から、ドライバンドアーク放電成分の電気量は乾燥過程でほとんど増加していないことが分かる。一方、導電性電流成分の電気量は乾燥過程でも増加していることが分かる。また、 20 mg/cm^2 の場合に導電性電流成分電気量は増加するのに対し、ドライバンドアーク放電成分の電気量は減少することが分かる。これは、試料表面の汚損物質が非常に多いため、噴霧によって汚損物質が吸収している水分量も増加し、乾燥帯が容易に形成されないことが原因であると考えられる。

図 3.16 に各 NSDD における 48 時間の累積電気量を、図 3.17 に各 NSDD における 48 時間の放電の発

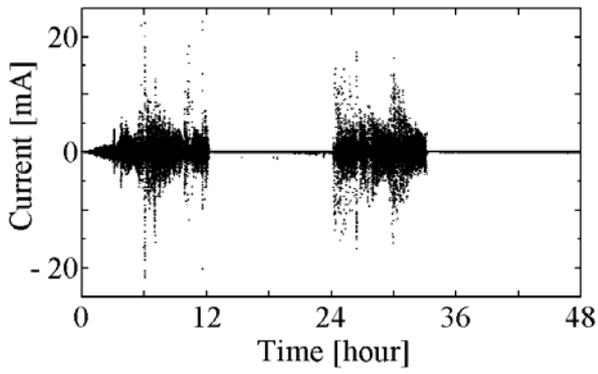
生頻度をそれぞれ示す。図 3.16 から、導電性電流成分の累積電気量は NSDD の増加に伴い大きくなっていることが分かる。試料表面の汚損物質が吸収する水分量が増加することで漏れ電流が増加したと考えられる。一方、ドライバンドアーク放電や放電の発生頻度は、NSDD が増加するにつれ小さくなっていることが分かる。図 3.18 に試験時間が 4 サイクル（96 時間）の場合の複合汚損試験の結果を示す。NSDD が 1 mg/cm^2 の場合には 48 時間の前後で電気量の発生に大きな違いが見られないが、NSDD が 20 mg/cm^2 の場合では 48 時間までの 2 サイクルに比べ、48 時間以降の 2 サイクルでは電気量が大きく増加していることが分かる。これは、汚損物質が多いと表面の水分量が多くなり、乾燥帯の形成が難しくなることを示している。また、3.3 節で述べた汚損ギャップの影響により NSDD が低い場合に多くの放電が発生していることも原因であると考えられる。



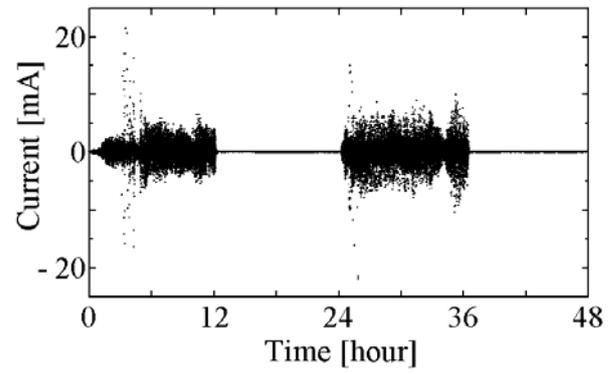
(a) 0 mg/cm²



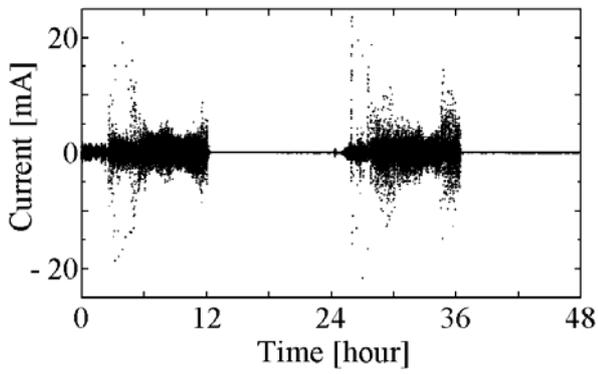
(b) 1 mg/cm²



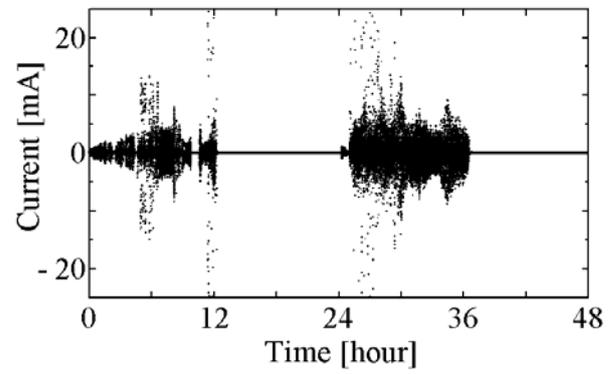
(c) 3 mg/cm²



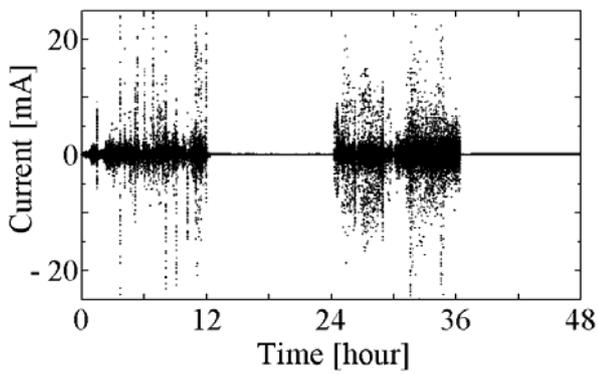
(d) 5 mg/cm²



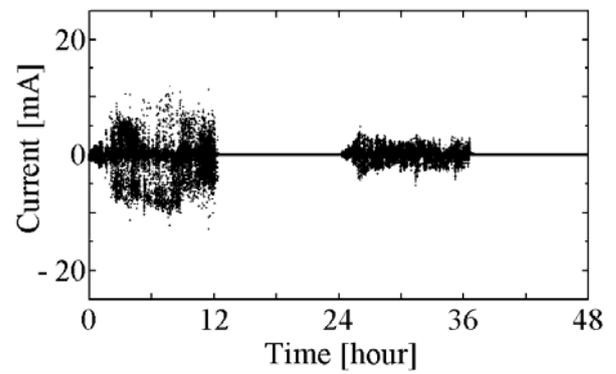
(e) 7 mg/cm²



(f) 10 mg/cm²



(g) 15 mg/cm²



(h) 20 mg/cm²

図 3.14 各 NSDD における波高値の時間変化

0-12, 24-36 : 噴霧過程, 12-24, 36-48 : 乾燥過程

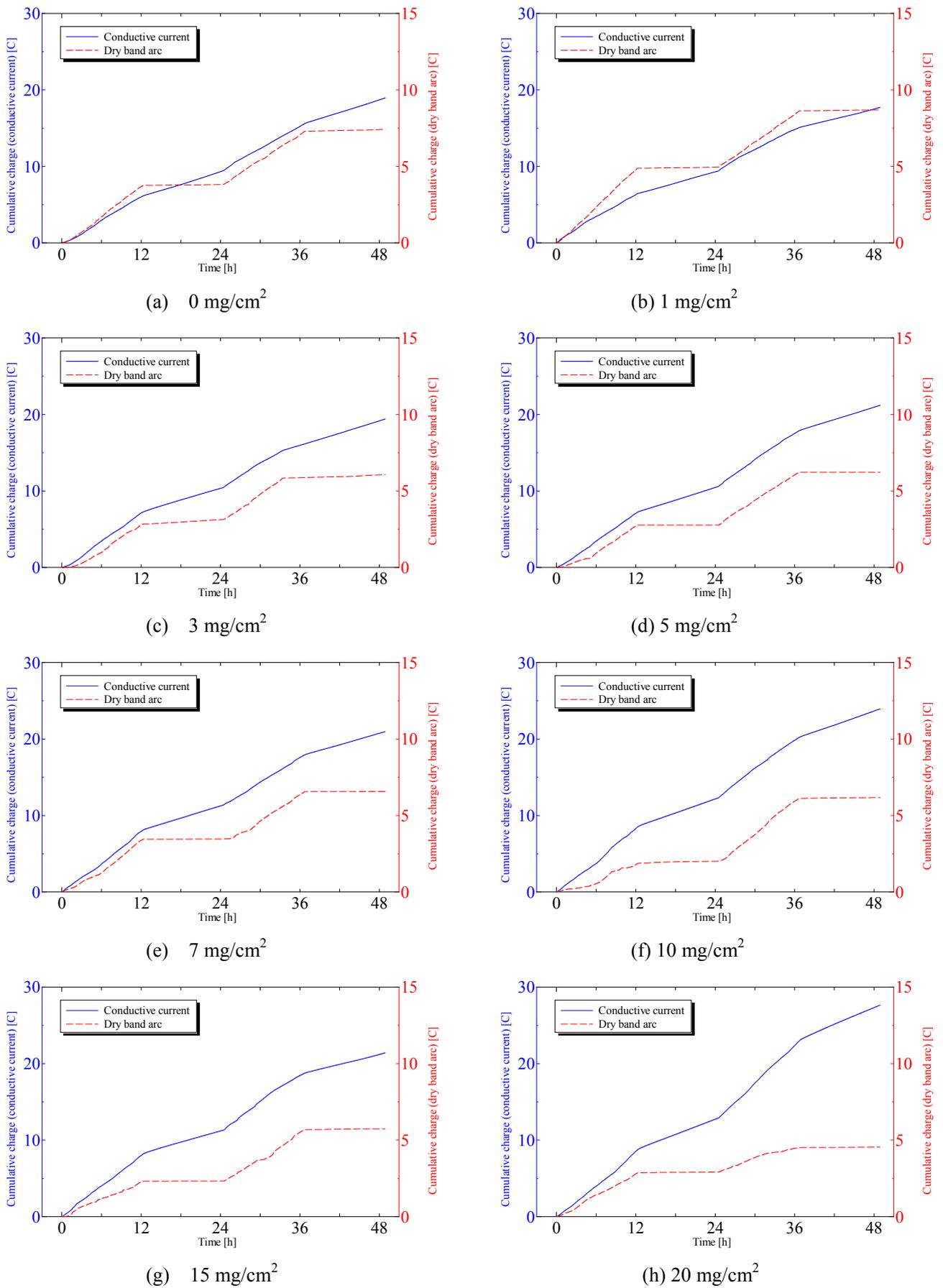


図 3.15 各 NSDD における累積電気量の時間変化

0-12, 24-36 : 噴霧過程, 12-24, 36-48 : 乾燥過程

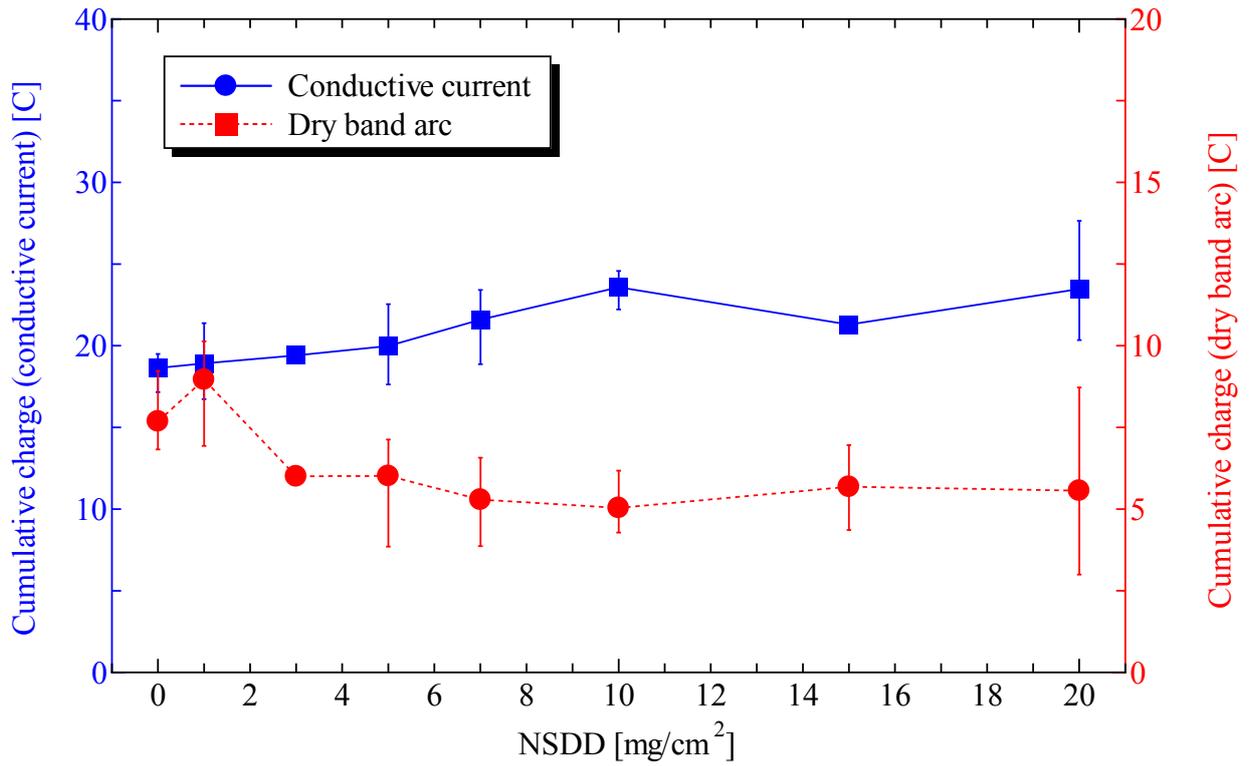


図 3.16 各 NSDD における導電性電気量と放電電気量

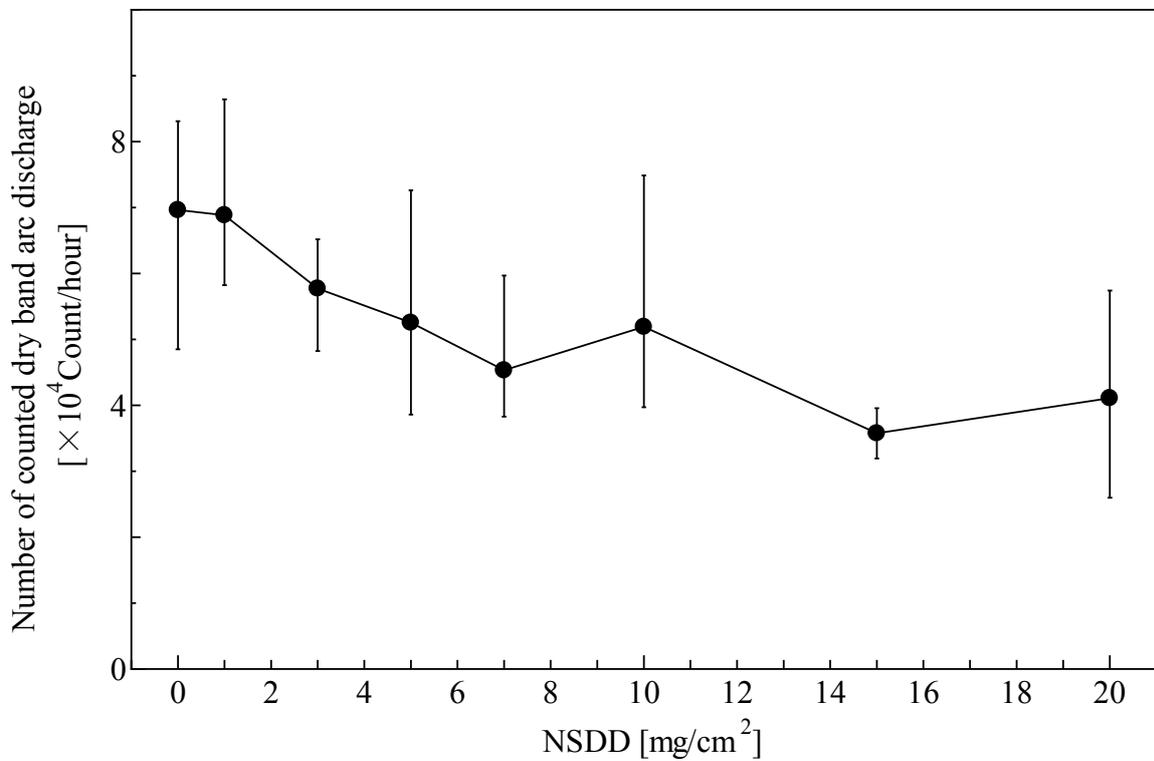


図 3.17 各 NSDD における放電回数

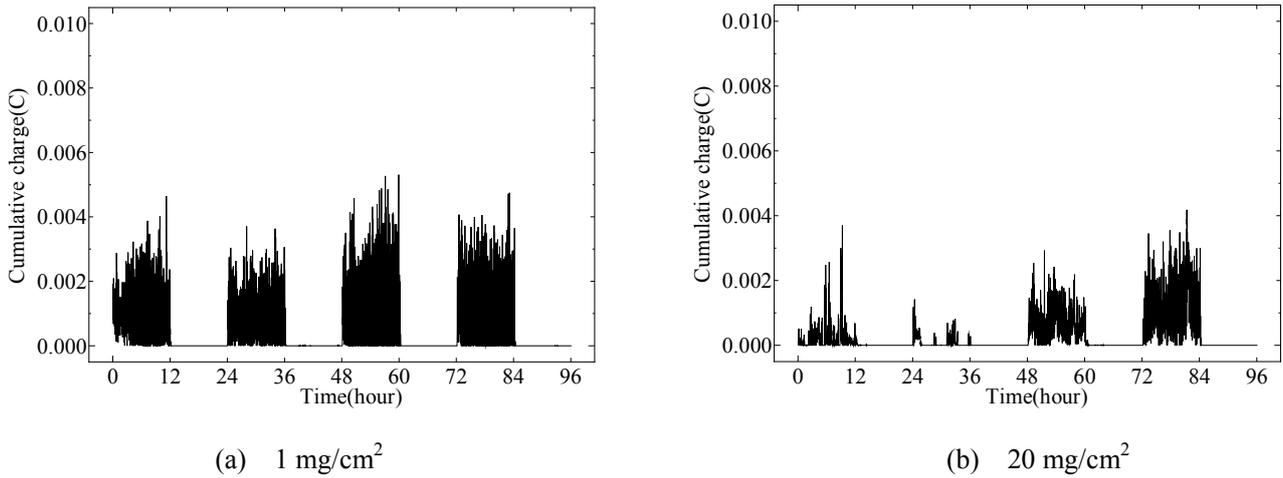


図 3.18 1 mg/cm² と 20 mg/cm² での 1 分毎の電気量累積値の時間変化 (4 サイクル)

3.5 まとめ

EVA の板状試料を用いて汚損湿潤試験及び複合汚損試験を行い、不溶性物質付着密度が試料に及ぼす電气的影響の検討を行った。その結果として、以下のような結果が得られた。

汚損湿潤試験では、全ての NSDD においてドライバンドアーク放電成分の電気量は噴霧時に増加する傾向が見られた。一方、導電性電流成分の電気量は乾燥過程でも増加の傾向を示し、NSDD が大きくなるにつれ増加の度合いが大きくなった。このことから、水分の供給がドライバンドアーク放電の発生に与える影響が大きいことが示された。また、累積電気量は導電性電流成分、ドライバンドアーク放電成分のどちらにおいても、5 mg/cm² を除き線形的に増加の傾向を示した。これは、NSDD が小さい場合には、汚損ギャップが乾燥帯のような役割を果たすことで汚損ギャップでの放電が発生することが原因である。

複合汚損試験では、全ての NSDD においてドライバンドアーク放電成分の電気量は噴霧過程に増加する傾向が見られた。また、導電性電流成分の電気量が乾燥過程でも増加の傾向を示し、NSDD が大きくなるにつれ増加の度合いが大きくなることも同様であった。一方、累積電気量は導電性電流成分、ドライバンドアーク放電成分ともに汚損湿潤試験と比べ、大きな値となった。さらに、導電性電流成分の電気量は NSDD が大きくなるにつれ増加の傾向を示したが、ドライバンドアーク放電電気量及び放電の発生頻度では、NSDD が大きくなるにつれ減少する傾向を示した。これは、汚損物質が多いと表面の水分量が多くなり、乾燥帯の形成が難しくなることや、汚損ギャップの影響により NSDD が小さい場合に多くの放電が発生していることが原因である。このことから、試料表面への水分の供給が同程度であっても、試料表面の汚損物質が少ない場合には、小規模の放電が多数発生することが分かった。これらのことより、不溶性汚損物質付着密度は加速劣化試験で考慮する必要があることが示唆された。

第4章 ポリマー材料の耐候性評価

4.1 ポリマー材料の耐候性評価の背景

シリコーンゴムをはじめとするポリマー材料は多くの利点を有しているが、有機物であるが故に経年劣化は免れない。また、日本は湿度が高く、台風等の自然災害も頻繁に発生する。つまり、ポリマー絶縁物が主に用いられている北米等と比べ、日本の気候はポリマー材料にとって非常に苛酷であると言える。そのため、ポリマー絶縁物を日本で用いるうえでその劣化機構の解明と長期信頼性の把握が最重要課題となっている⁽²⁾。

電気絶縁物が用いられる屋外環境において、絶縁物に与えられるストレスの要因は様々であり、季節や設置される地域の環境等によっても劣化の程度は大きく異なる。そのため、長期的なポリマー材料の劣化評価は、実フィールドでの長期間曝露（屋外曝露試験）をすることが最適であるが、結果を得るまでに多くの時間と労力を費やすこと等の問題がある。そのため、劣化に寄与する環境ストレスを凝縮・加速すること（人工加速劣化試験）により、短期間のうちに寿命を評価し、曝露試験の結果と照らし合わせることによる長期信頼性の把握が求められている⁽⁷⁾。

本研究では、ポリマー罫子用外被材料の長期信頼性を解明することを目的とし、10年前後実線路で使用されていたポリマー罫子の撤去品を用いて、塩霧試験及び外被材料の組成分析を行うことによって、罫子の劣化の有無と耐汚損特性との関係を調べた。また、SiR系の罫子については撥水性を確認することを目的として、撥水性の評価方法の一つであるSTRI法を適用して撥水性を評価した。

4.2 評価方法

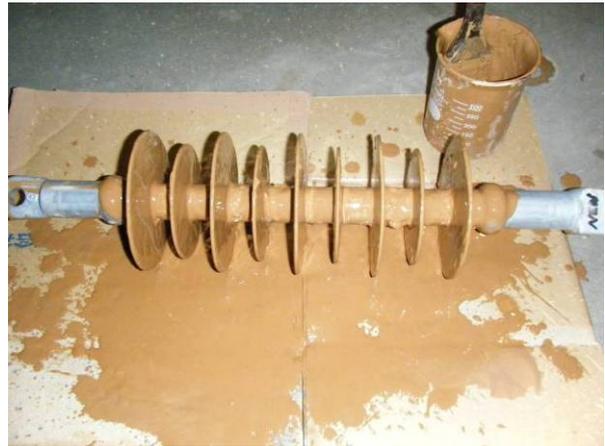
本試験では、EVA罫子経年品との比較を目的として新品のEVA罫子を用いた。試験前、新品の罫子表面には離型剤であるフッ素による撥水性が確認されたが、第2章で述べたように、この撥水性は新品特有のものであり、実線路に設置後4～5年程度で失われてしまうため、新品と経年品を等しい条件で評価するためには、新品表面のフッ素を除去する必要があると考えられた。従って、以下の工程で表面のフッ素を除去した⁽¹⁶⁾。

- ①との粉1.5：水1の分量で混ぜたとの粉混濁液を罫子表面に塗布し、24時間乾燥させる。
- ②乾燥させた罫子を水に浸し、24時間放置する。
- ③罫子表面に付着したとの粉をコンプレッサーで洗い流す。

以上の①～③の工程を2回繰り返した。実際の作業の様子は図4.1に示すとおりである。



(a) 撥水性除去前



(b) との粉塗布 (24 時間乾燥)



(c) 水浸 (24 時間放置)



(d) との粉の洗い流し

図 4.1 新品碍子表面の撥水性除去工程

図 4.2 に塩霧試験回路を、図 4.3 に実際の試料設置の様子をそれぞれ示す。塩霧試験には EVA 系、シリコーンゴム (SiR) 系及び EPDM 系の 22 kV 配電線用引留め碍子 16 本と、SiR 系の通り碍子 2 本の計 18 本を用いた。碍子の名称はそれぞれ、「設置された地域を表す記号-メーカーを表す記号-形状を表す記号-各試料を区別する番号」となっている。試験電圧には、同配電線の常規対地電圧である 13.3 kVrms を用いた。試験中は常時課電するとともに、累積電気量が最も多くなる導電率 16 mS/cm の塩霧を噴霧量 1.2 l/h で常時噴霧した。試験時間は 96 時間に設定し、試験中のアーク放電電気量、漏れ電流波高値によって試料の耐汚損特性を評価した。また、一部の EVA 碍子では課電側笠部にトラッキング痕が見られた。塩霧試験開始後、図 4.4 に示すように噴霧開始から 30 分程度で塩霧が試験容器内にほぼ充満し、その後、試験終了まで試験容器外から内部の様子はほとんど観察できない状態である。

塩霧試験終了後、塩霧試験に用いた上記試料及び塩霧試験を行わなかった引留め碍子 2 本と通り碍子

2本の、全7種類22本の外被を切り取り、フーリエ変換赤外分光光度計（FT-IR, JASCO FT/IR-4200）を用いて表面の組成分析を行った。

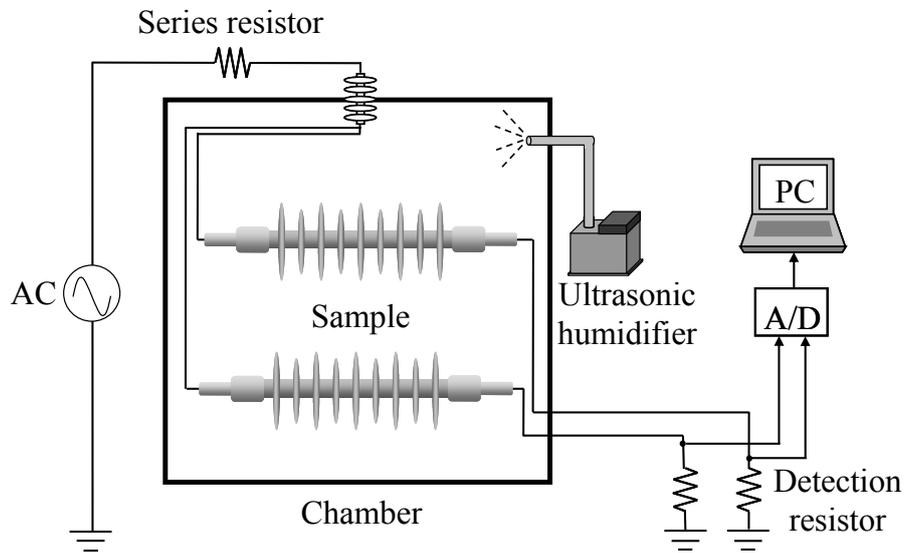


図 4.2 塩霧試験回路

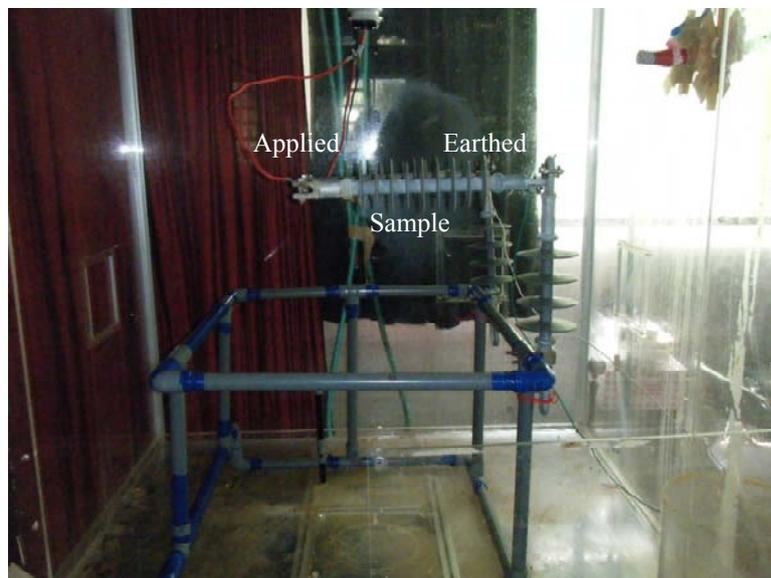


図 4.3 試験容器内の様子



(a) 試験開始直後の様子



(b) 10 分後の様子



(c) 20 分後の様子



(d) 30 分後の様子

図 4.5 塩霧試験中の試験容器内の様子

4.3 試験結果

4.3.1 塩霧試験による電気的特性評価

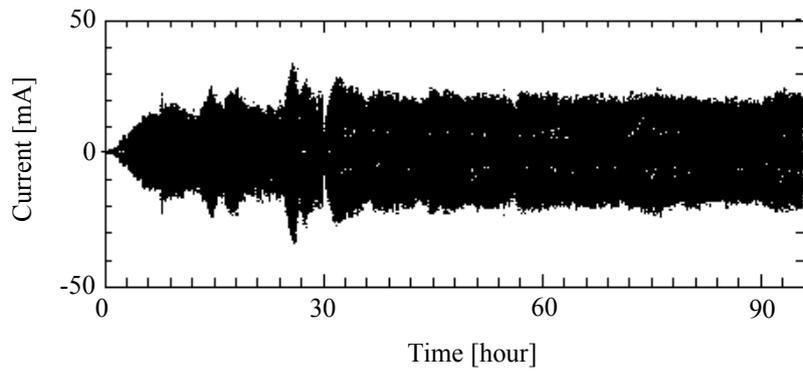
4.3.1.1 EVA 系引留め碍子

塩霧試験における漏れ電流波高値の時間変化を図 4.6 に示す。同図から、新品以外の碍子（A-H-1, A-H-2, A-H-3）の波高値はいずれも一定の間隔（5～10 時間程度）で波高値 30 mA 程度のピーク値を取り、その後徐々に小さくなる。このような傾向がみられた理由としては試料表面に汚損を施していない（NSDD が 0 mg/cm^2 ）ため、“試験中の試料表面が十分な湿潤状態になったことによる急激な放電の発生”，“急激な放電による試料表面の乾燥”，“乾燥による漏れ電流の減少，漏れ電流の減少による試料表面の湿潤”といった 3 つの現象からなるサイクルによるものと考えられる。また，EVA 板状試料を用いた塩霧試験でも同様の傾向が得られていることから⁽¹⁷⁾，EVA 試料を用いて塩霧試験を実施した場合に通

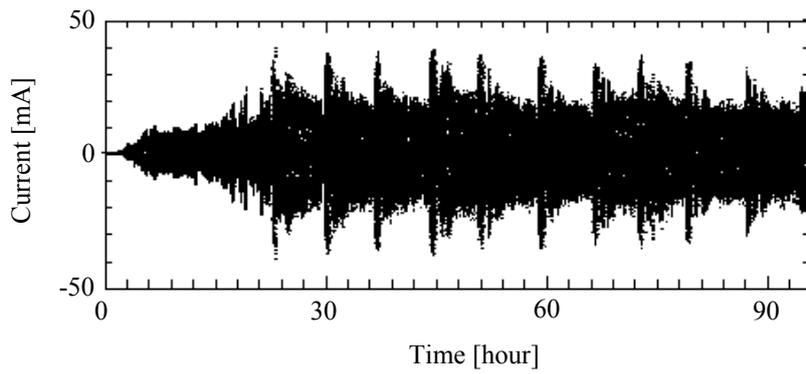
常起こりうる現象であると考えられる。

図 4.7 に各試料における試験後の写真を示す。同図から、全ての試料において碍子胴部への塩分の付着を確認できる。このことから、試験中、放電は主に碍子胴部に集中していたものと考えられる。

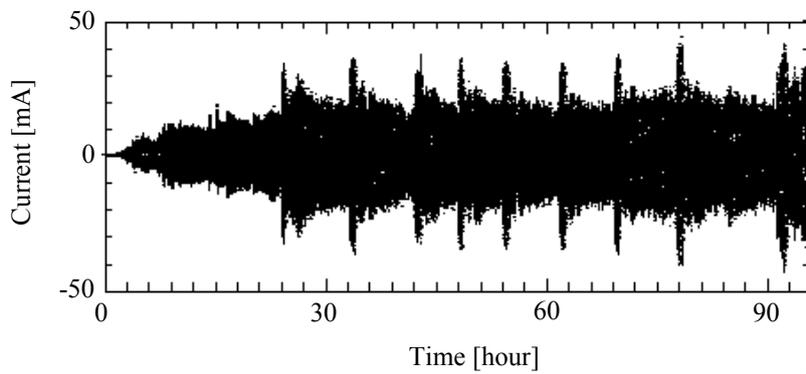
図 4.8 に累積アーク放電電気量の時間変化を示す。同図より、アーク放電電気量は新品の EVA 碍子で最も大きくなっていることが分かる。経年品についてはいずれもほぼ一定の割合で電気量が増加しており、全ての経年品でほぼ等しい値となっていることが分かる。新品の碍子で最も大きな電気量が得られた原因としては、表面の撥水性除去作業で重度の汚損を急速に繰り返すため、との粉を完全に洗い流すことが困難であることが挙げられる。この結果から、10 年程度実線路で使用されていた EVA 系引留め碍子の経年品は、台風等や経年による碍子表面の汚損によって離型剤のフッ素による表面の撥水性は消失していたが、新品とほぼ同等の漏れ電流特性を保持していることが示された。



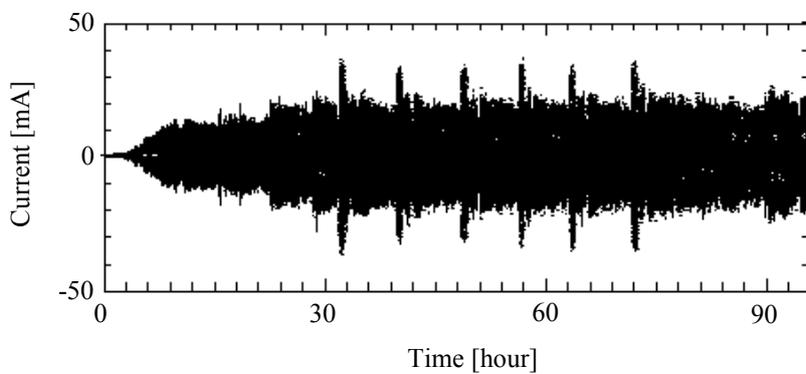
(a) EVA 新品



(b) A-H-1

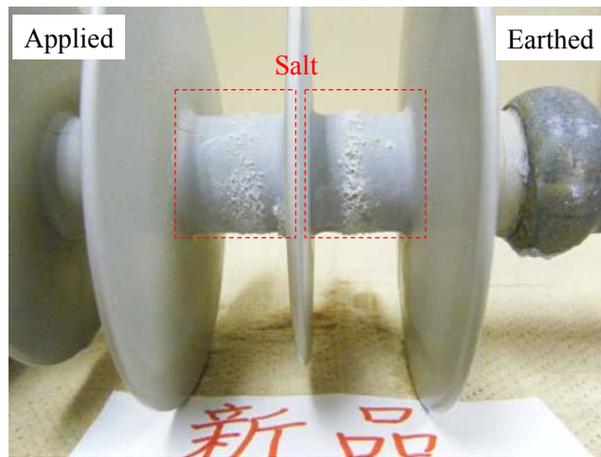


(c) A-H-2

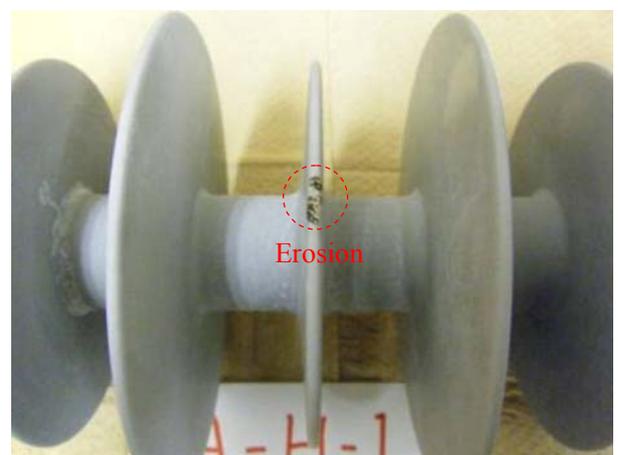
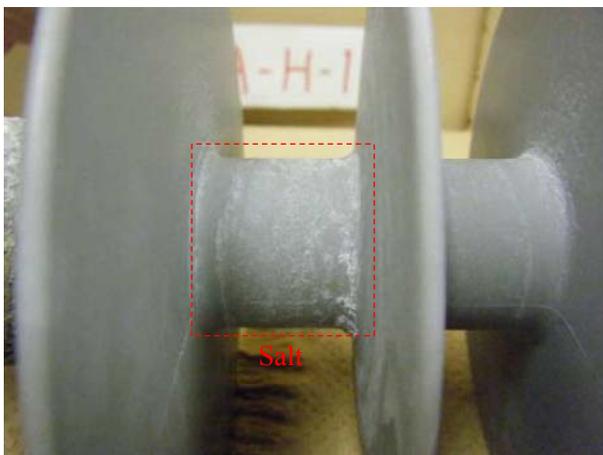


(d) A-H-3

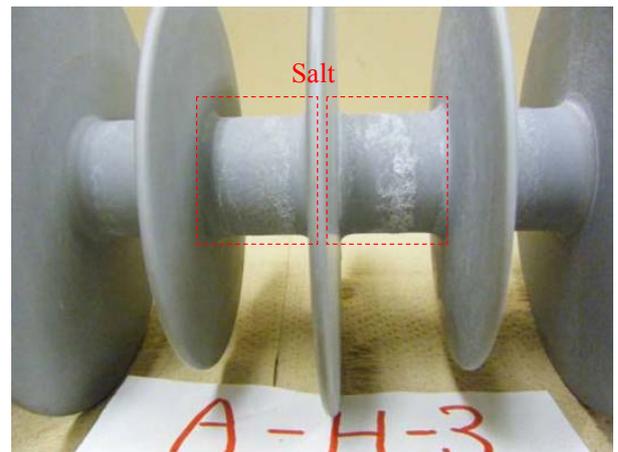
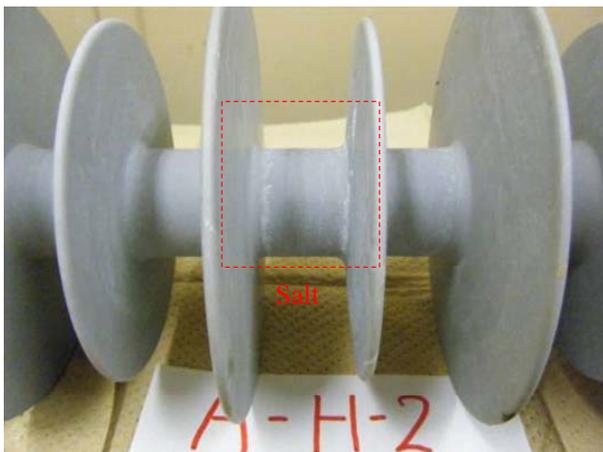
図 4.6 漏れ電流波高値の時間変化 (EVA 碍子)



(a) EVA 新品（接地側胴部に多量の塩分付着）



(b) A-H-1（課電側胴部に塩分付着，課電側から4枚目の笠上部に放電痕）



(c) A-H-2（中央付近の胴部に塩分付着）

(d) A-H-3（中央付近の胴部に塩分付着）

図 4.7 塩霧試験後の試料の様子（EVA 碍子）

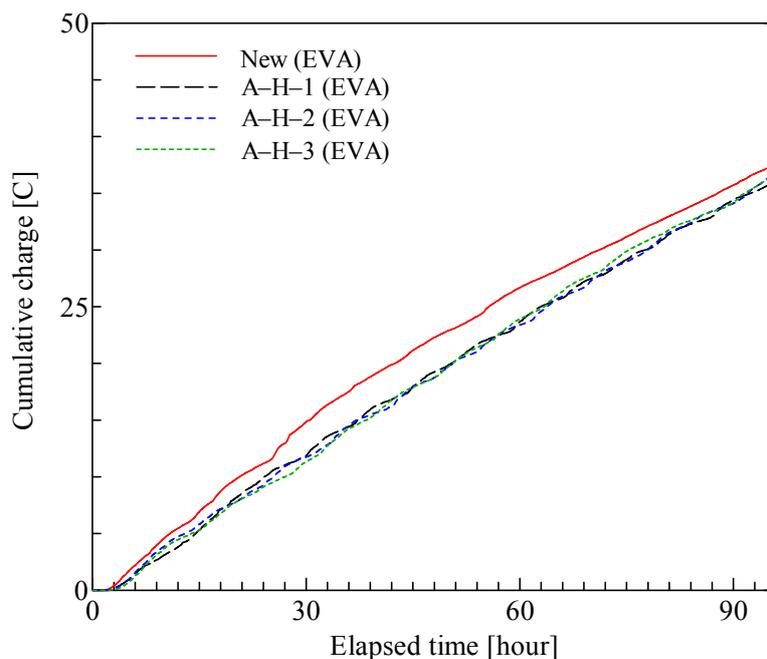


図 4.8 累積アーク放電電気量の時間変化 (EVA 碇子)

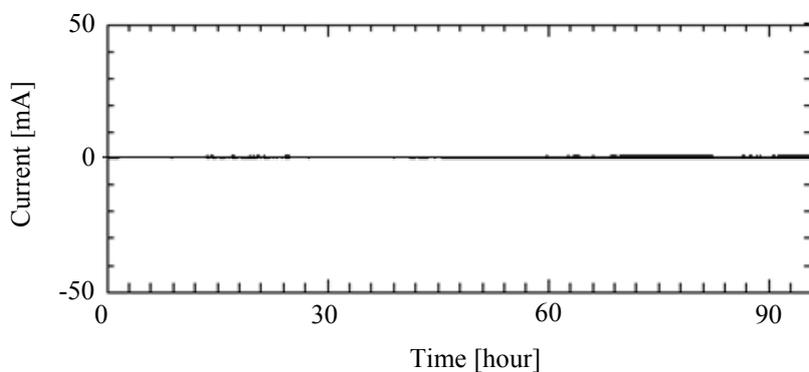
4.3.1.2 SiR 系引留め碇子

塩霧試験における漏れ電流波高値の時間変化を図 4.9 に示す。同図より、K-N-H-2 及び K-N-H-3 については、試験開始から終了にかけてほとんど波高値に変化が見られないことが分かる。一方、K-N-H-5 については試験開始から 50 時間前後で少しずつ波高値が増加し始め、試験開始から 87 時間程度の時点で最大の波高値が得られたことが分かる。しかし、その波高値は最大でも 5 mA 程度と、非常に小さなものであった。

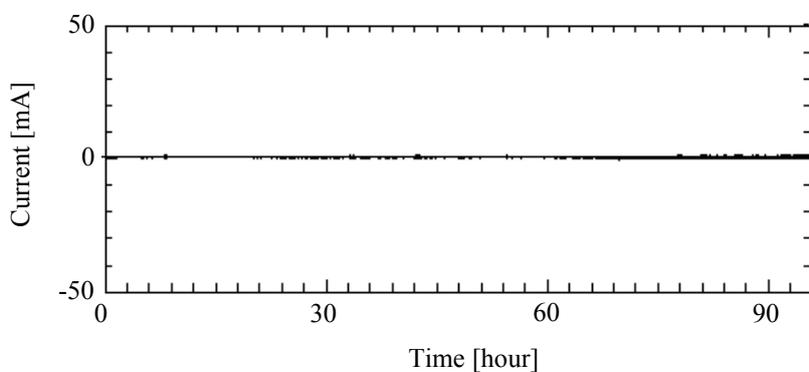
図 4.10 に各試料における試験後の写真を示す。同図より、K-N-H-2 及び K-N-H-3 については、K-N-H-3 の中央胴部に微小な放電痕のような痕が確認されたものの、それ以外にほとんど外傷はなく、試験後も良好な撥水性を保っていたことが分かる。一方、K-N-H-5 については、碇子中央付近の胴部及び笠部に放電痕が確認された。しかし、放電痕が生じている箇所以外では試験後も撥水性は良好であり、外傷も見られなかった。また、EVA 系引留め碇子で見られたような塩分の付着は見られなかったことから放電があまり発生していないと考えられる。

図 4.11 に累積アーク放電電気量の時間変化を示す。同図は、他の試料との比較を容易にするため、縦軸を同じスケールにしてある。そのため、K-N-H-2 と K-N-H-3 は横軸とほぼ重なっている。同図から、K-N-H-2 と K-N-H-3 については全くアーク放電電気量が検出されていないことが分かる。また、K-N-H-5 に関しては試験開始から 50 時間前後経過した時点からアーク放電電気量が検出され始めているが、最終的な電気量は 7 C 程度であった。この値は前述の EVA で得られた電気量と比べると非常に小さな値で

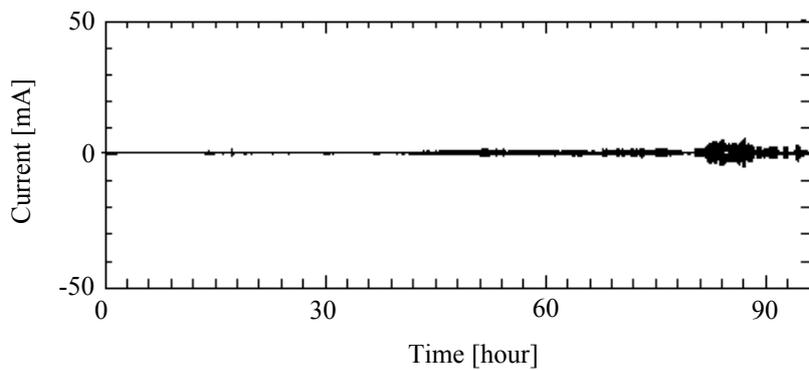
あり、撥水性も非常に良好であったことから、SiR 系引留め罫子は、10 年前後実環境で使用されたにもかかわらず依然として良好な耐汚損性能を保持していることが示された。



(a) K-N-H-2

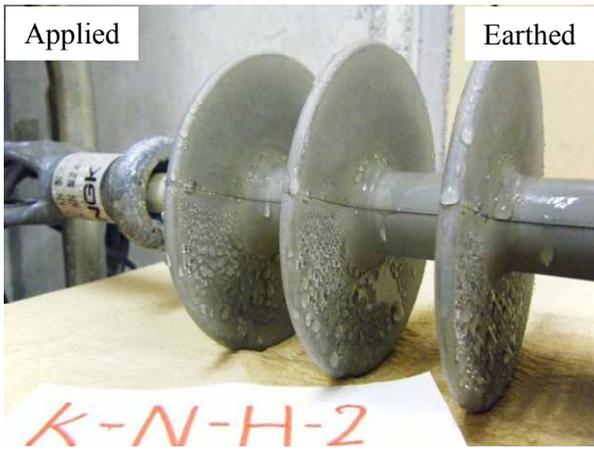


(b) K-N-H-3

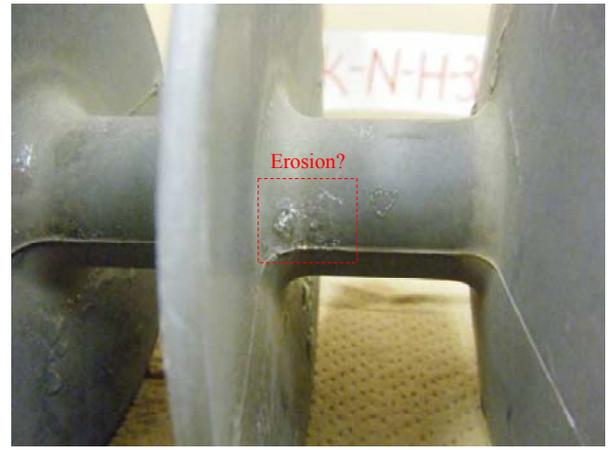


(c) K-N-H-5

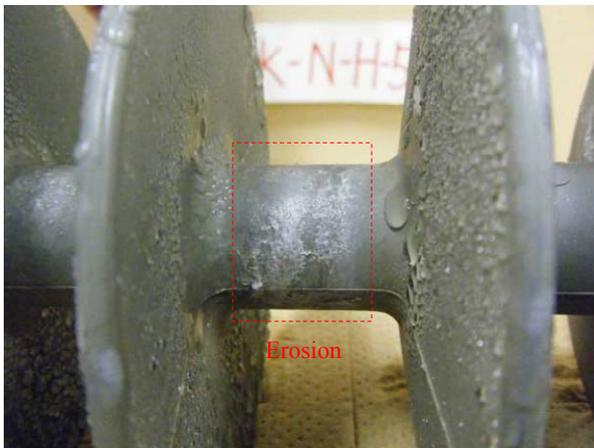
図 4.9 漏れ電流波高値の時間変化 (SiR 罫子)



(a) K-N-H-2 (外傷なし, 撥水性良好)



(b) K-N-H-3 (中央付近の胴部に放電痕のような痕, 撥水性良好)



(c) K-N-H-5 (中央付近の胴部及び笠部に放電痕, 撥水性良好)



図 4.10 塩霧試験後の試料の様子 (SiR 罫子)

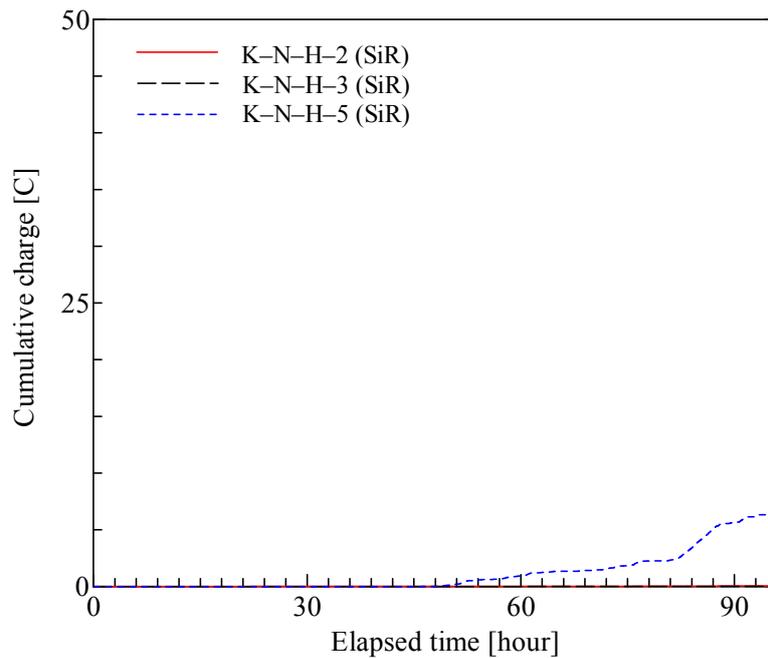


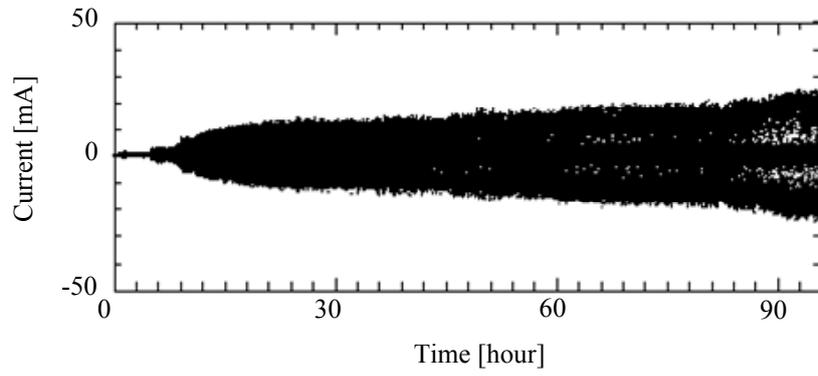
図 4.11 累積アーク放電電気量の時間変化 (SiR 罫子)

4.3.1.3 SiR系引留め碍子A（レーストラック）

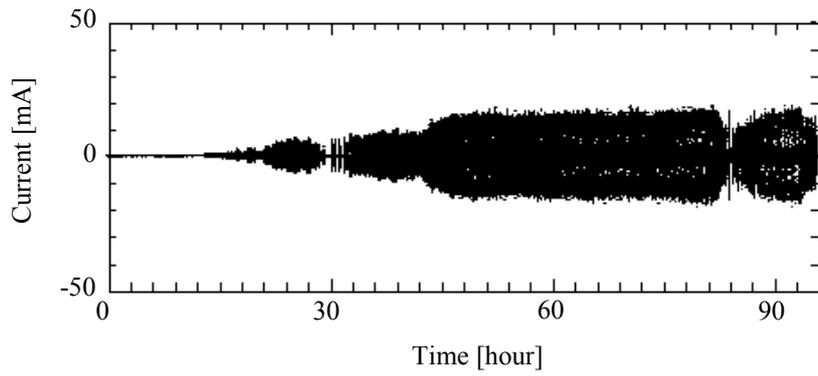
塩霧試験における漏れ電流波高値の時間変化を図 4.12 に示す。同図より、K-NR-H-1 及び K-NR-H-3 については、試験開始から放電開始までの時間が 6 時間程度であるのに対し、K-NR-H-2 については試験開始から放電が開始するまでに 15 時間程度の時間を要していることが分かる。このように、試料の間で放電開始までの時間に違いが生じた原因としては、試験前の碍子の撥水性の状態、表面に付着した水分量の違い等が考えられる。これら 3 本の碍子は、実環境での使用期間中に表面に苔が繁殖していた。撤去後も実環境で使用されていた状態のまま評価するため、苔を枯らさないように定期的に表面への水の吹き付け作業を行っていた。そのため、撤去した時点における苔の付着状態の違いに加えて、前述したような撥水性及び水分付着量の違いが生じ、放電開始時間に差異が生じたものと考えられる。

図 4.13 に各試料における試験後の写真を示す。全ての試料において胴部での塩分の付着が確認できる。このことから、試験中、放電は主に碍子胴部に集中して発生していたものと考えられる。また、全ての試料において、胴部及び笠部の全面においてほとんど撥水性が残っておらず、高い撥水性により放電の発生を抑制するという SiR としての特性が失われていることが確認された。

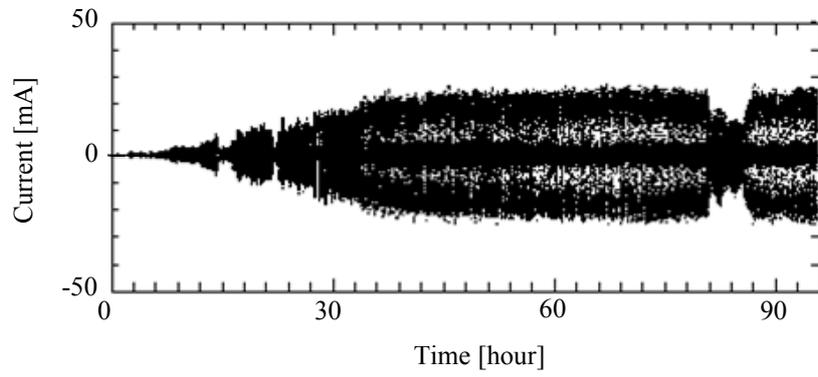
図 4.14 に累積アーク放電電気量の時間変化を示す。前述したように、K-NR-H-2 については他の試料より放電開始までの時間に遅れがみられたが、放電開始後の電気量の増加割合は全ての試料でほとんど等しくなっていることが分かる。このことから、全ての試料において SiR としての特性は失われており、劣化の度合いは同程度であると考えられる。



(a) K-NR-H-1



(b) K-NR-H-2



(c) K-NR-H-3

図 4.12 漏れ電流波高値の時間変化 (SiR 系レーストラック碍子)



(a) K-NR-H-1 (胴部への塩分付着, 撥水性ほとんどなし)



(b) K-NR-H-2 (胴部への塩分付着, 撥水性ほとんどなし)



(c) K-NR-H-3 (胴部への塩分付着, 撥水性ほとんどなし)

図 4.13 塩霧試験後の試料の様子 (SiR 系レーストラック碍子)

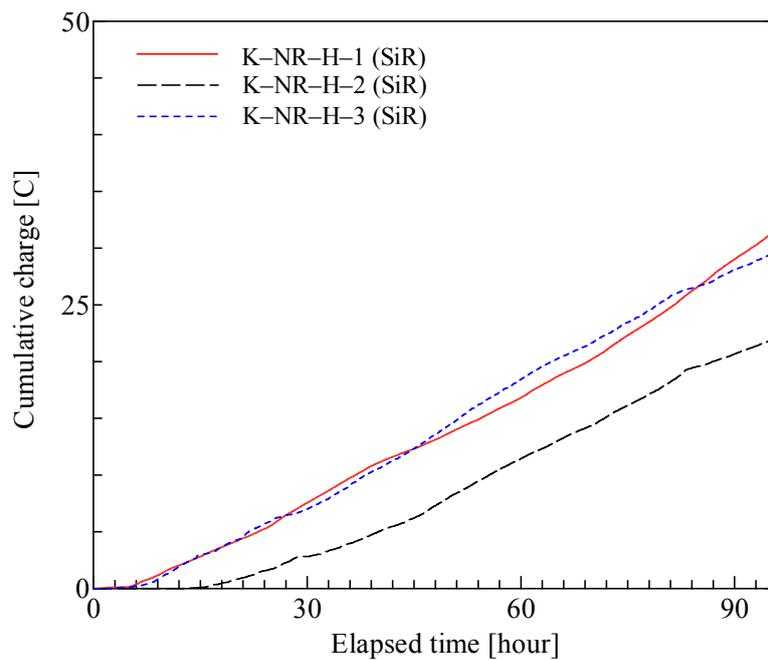


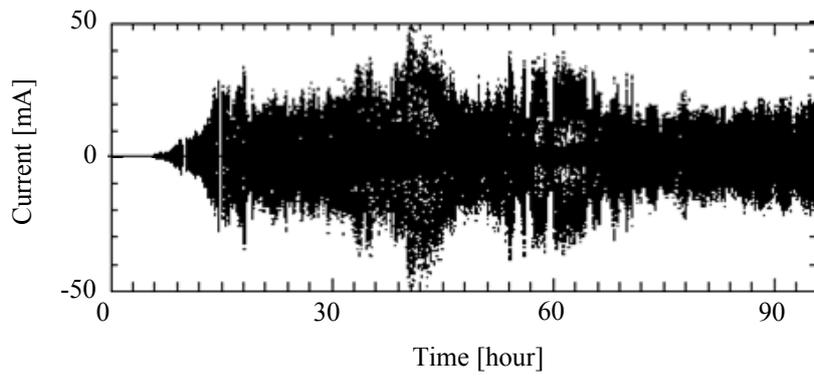
図 4.14 累積アーク放電電気量の時間変化 (SiR 系レーストラック碍子)

4.3.1.4 SiR系引留め碍子B（レーストラック）

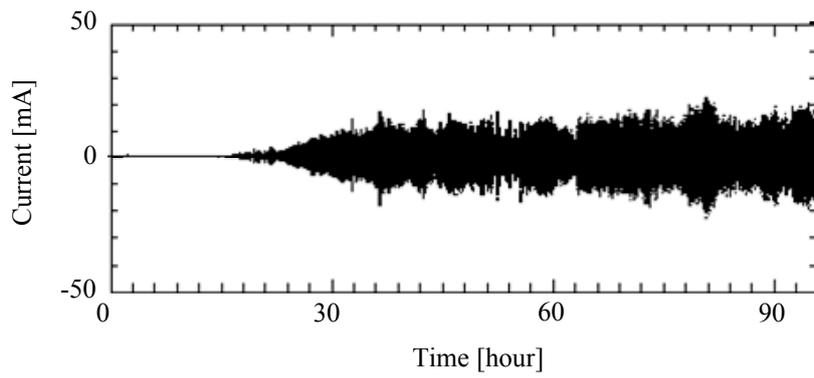
塩霧試験における漏れ電流波高値の時間変化を図 4.15 に示す。同図より、K-M-H-1 及び K-M-H-6 については、試験開始から放電開始までの時間が 6 時間程度であるのに対し、K-M-H-5 については試験開始から放電が開始するまでに 18 時間程度の時間を要していることが分かる。このように、試料の間で放電開始までの時間に違いが生じた原因としては、試験前の碍子の撥水性の状態、表面に付着した水分量の違い等が考えられる。これら 3 本の碍子は、4.3.1.3 節で述べたものと同様に、実環境での使用期間中に表面に苔が繁殖していたため、撤去後も苔を枯らさないように定期的に表面への水分の吹き付けを行っていた。そのため、撤去した時点における苔の付着具合の違いに加えて、撥水性及び水分付着量の違いが生じ、放電開始時間に違いが生じたものと考えられる。

図 4.16 に各試料における試験後の写真を示す。同図のように、全ての試料において胴部への塩分の付着が確認された。このことから、試験中、放電は主に碍子胴部に集中していたものと考えられる。また、いずれの試料についても、胴部及び笠部の全面においてほとんど撥水性が残っておらず、SiR としての特性が失われていることが確認された。

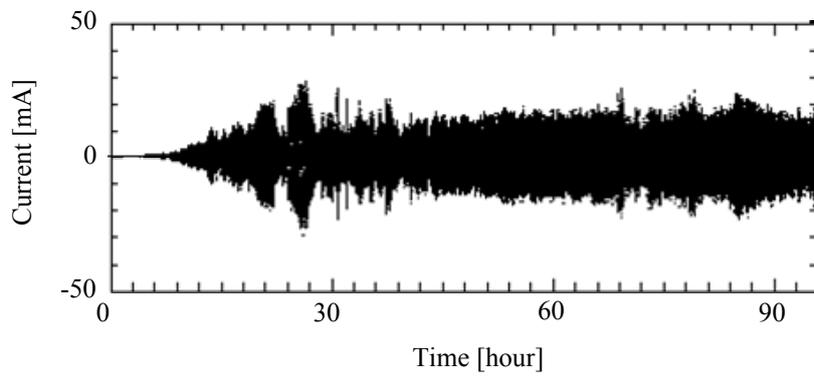
図 4.17 に累積アーク放電電気量の時間変化を示す。K-M-H-1 において試験開始から 40 時間～90 時間程度で山なりになる傾向がみられたが、放電開始後の電気量の増加割合は、いずれの試料についてもほとんど等しくなっていることが分かる。このことから、全ての試料において SiR としての特性は失われており、また劣化の度合いはほとんど同程度であると考えられる。



(a) K-M-H-1

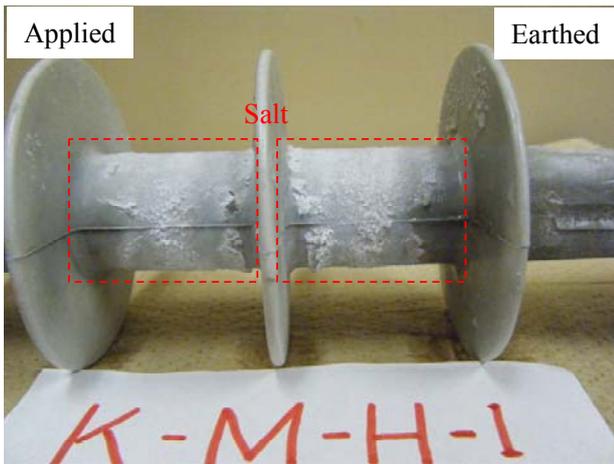


(b) K-M-H-5

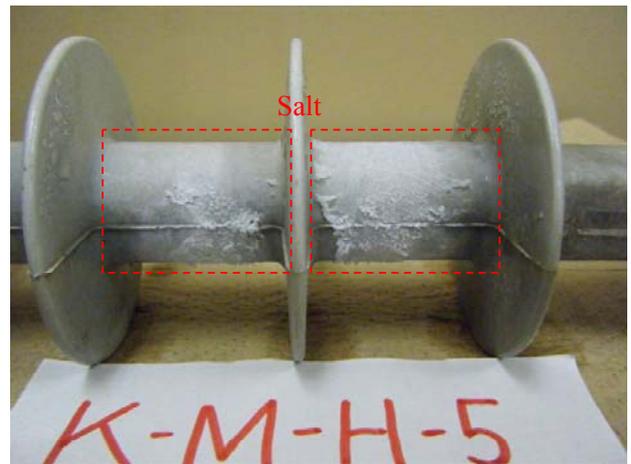


(c) K-M-H-6

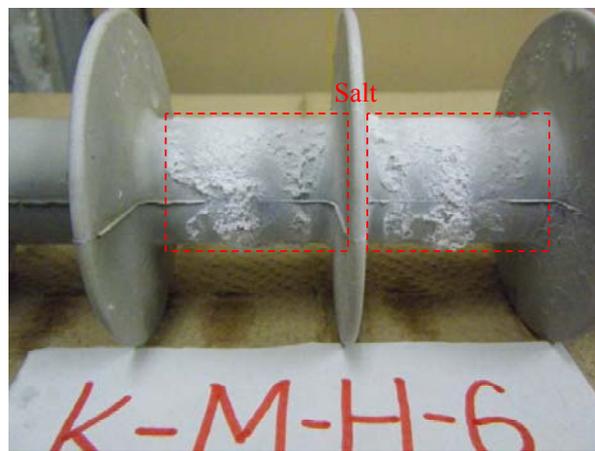
図 4.15 漏れ電流波高値の時間変化 (SiR 系レーストラック碍子)



(a) K-M-H-1 (胴部への塩分付着,
全体的に撥水性低下)



(b) K-M-H-5 (胴部への塩分付着,
全体的に撥水性低下)



(c) K-M-H-6 (胴部への塩分付着, 全体的に撥水性低下)

図 4.16 塩霧試験後の試料の様子 (SiR 系レールトラック碍子)

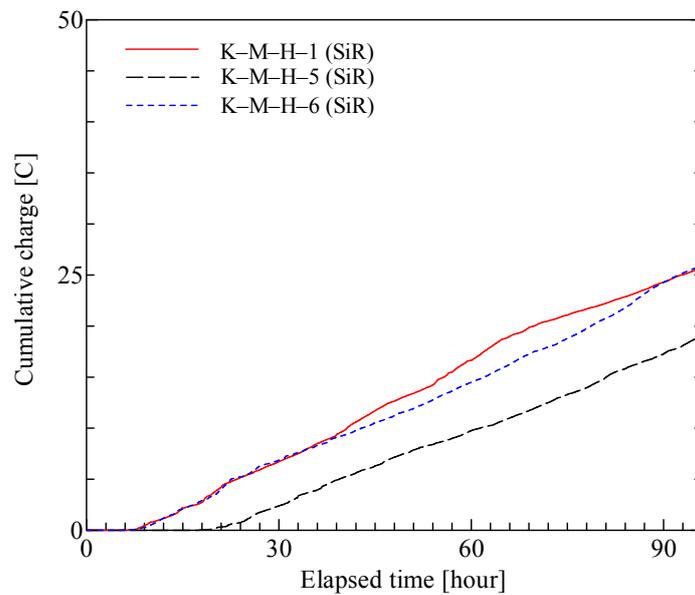


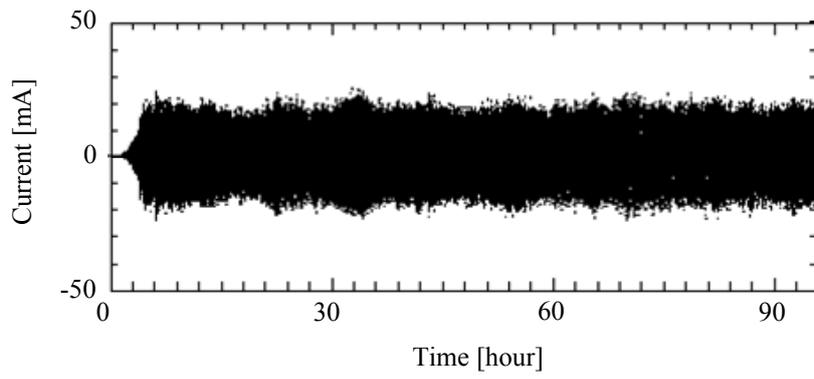
図 4.17 累積アーク放電電気量の時間変化 (SiR 系レールトラック碍子)

4.3.1.5 EPDM 系引留め碍子

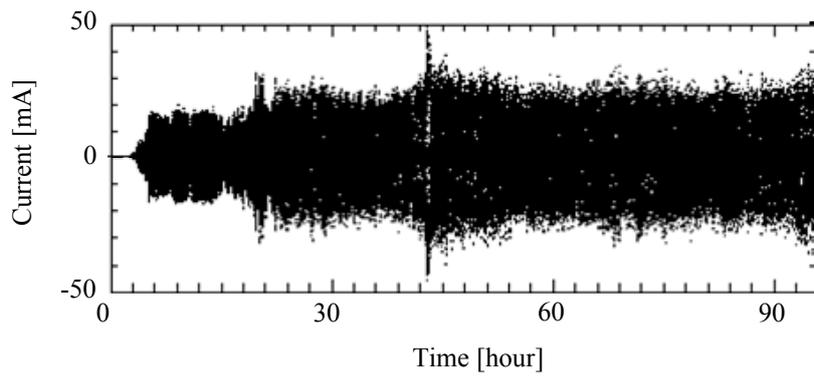
各試験における漏れ電流波高値の時間変化を図 4.18 に示す。同図より、全ての試料において試験開始から 3 時間程度で放電が開始しており、その後ほとんど一定の増加傾向で推移していることが分かる。また、EPDM 碍子の場合、4.3.1.1 節で示した EVA 系引留め碍子の漏れ電流で見られたような一定間隔の波高値の起伏は見られなかった。

図 4.19 に各試料の試験後の写真を示す。全ての試料において碍子胴部への塩分の付着が確認できる。このことから、試験中、放電は主に碍子胴部に集中していたものと考えられる。碍子の笠部についても全体的に白く変色しているように見えるが、これは試験中の塩分の付着によるものではなく、実環境で曝露されているうちに生じたチョーキングによるものである。

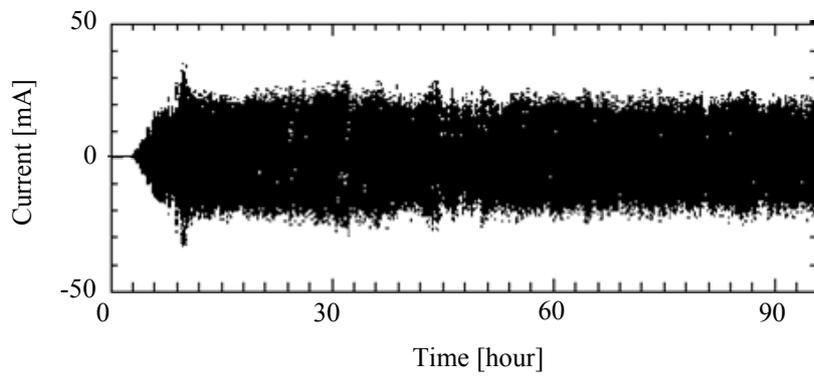
図 4.20 に累積アーク放電電気量の時間変化を示す。全ての試料の電気量はほとんど一定の割合で増加しており、電気量の増加割合、最終値ともに試料間で大きな違いはない。



(a) K-EP-H-1

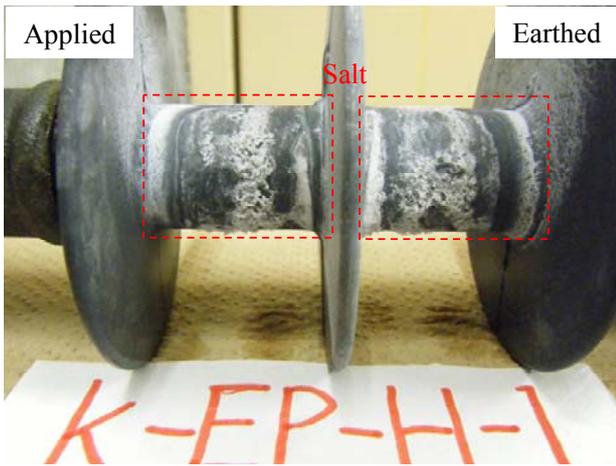


(b) K-EP-H-3

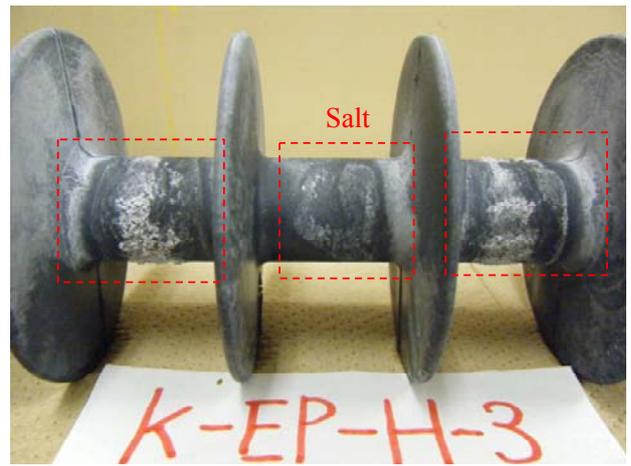


(c) K-EP-H-4

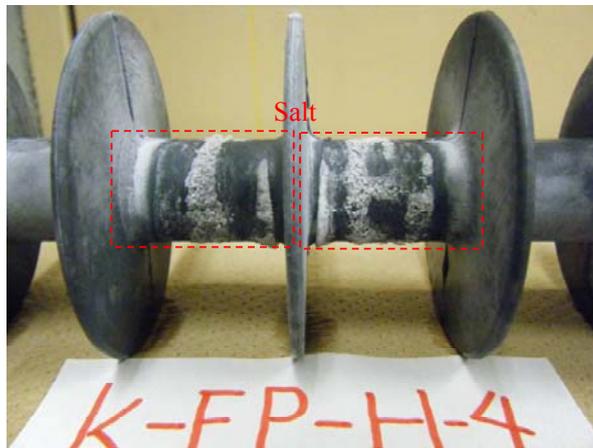
図 4.18 漏れ電流波高値の時間変化 (EPDM 罫子)



(a) K-EP-H-1 (胴部への塩分付着)



(b) K-EP-H-3 (胴部への塩分付着)



(c) K-EP-H-4 (胴部への塩分付着)

図 4.19 塩霧試験後の試料の様子 (EPDM 碍子)

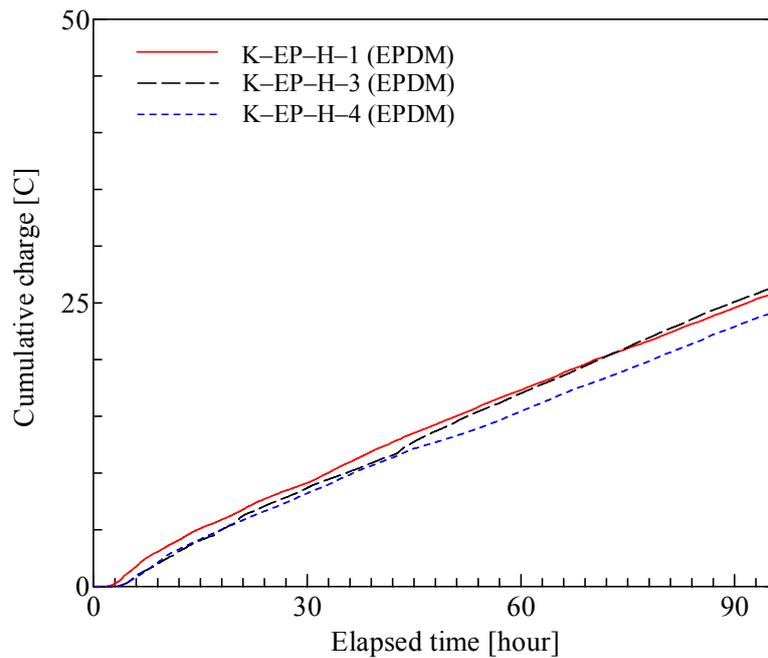
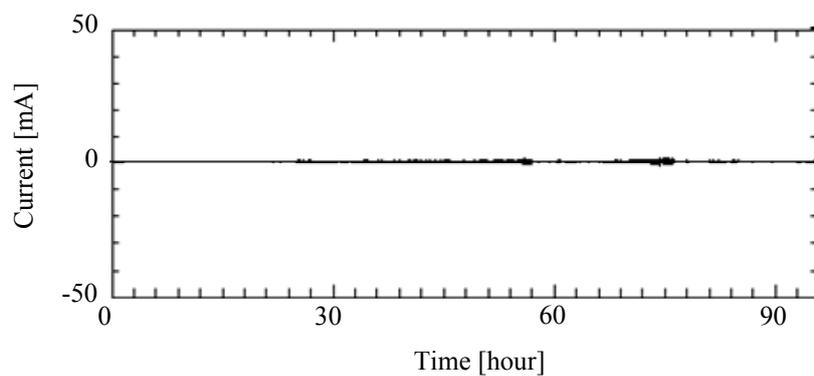


図 4.20 累積アーク放電電気量の時間変化 (EPDM 碍子)

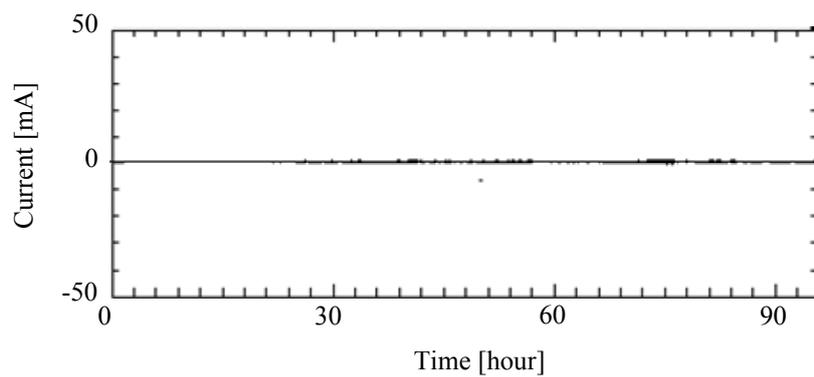
4.3.1.6 SiR系通り碍子

各試験における漏れ電流波高値の時間変化を図 4.21 に示す。同図から明らかなように、K-N-T-2 と K-N-T-4 とともにほとんど変化がみられず、試験後の両試料に放電によるものと思われる外傷は全く確認されなかった。一方で、図 4.22 に示しているように、両者の撥水性には違いがみられた。K-N-T-4 については碍子胴部、笠部ともに撥水性は良好であったが、K-N-T-2 については笠部の撥水性が比較的不良である。この違いは、試験前の碍子の状態の違いによる。K-N-T-2 については、実環境での使用期間中に笠表面に苔が繁殖していた。撤去後も苔の付着を保持するため、定期的に表面への水分の吹き付けを行っていた。そのため、塩霧試験を行う前から撥水性が低下した状態にあった。

各試験の累積アーク放電電気量の時間変化を図 4.23 に示す。同図は、他の試料との比較を容易にするため、縦軸を同じスケールにしてある。そのため、K-N-T-2 と K-N-T-4 とともに横軸とほぼ重なっている。同図のように、K-N-T-4 に関しては、アーク放電は全く検出されなかった。K-N-T-2 に関しては、試験開始から 45 時間前後経過した時点から若干アーク放電が検出され始めているが、最終的な電気量は 0.66 C 程度で非常に小さな値であった。この結果から、これらの碍子は、10 年前後実環境で使用されたにもかかわらず依然として良好な耐汚損性能を保持していると言える。



(a) K-N-T-2



(b) K-N-T-4

図 4.21 漏れ電流波高値の時間変化 (SiR 通り碍子)



(a) K-N-T-2 (外傷なし。笠部の撥水性は不良。)

(b) K-N-T-4 (外傷なし。撥水性良好。)

図 4.22 塩霧試験後の試料の様子 (SiR 通り碍子)

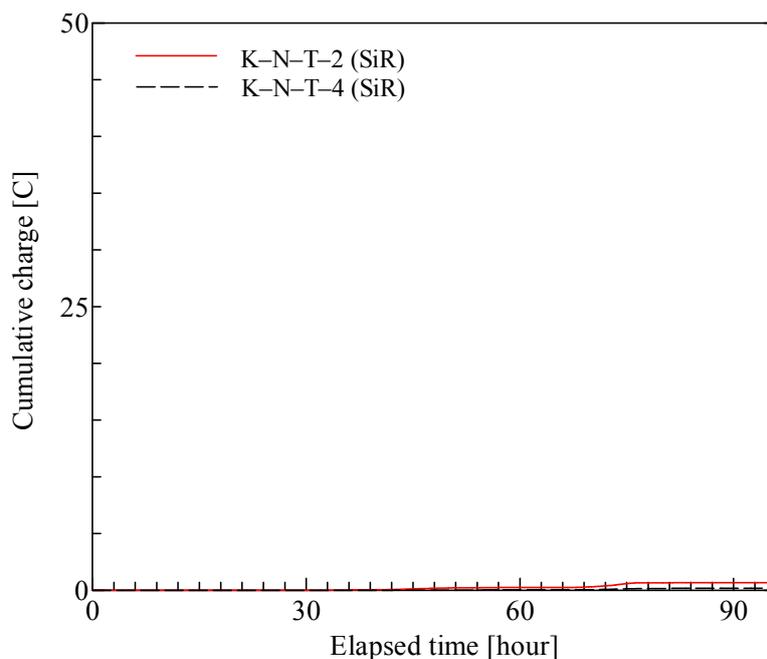


図 4.23 累積アーク放電電気量の時間変化 (SiR 通り 碍子)

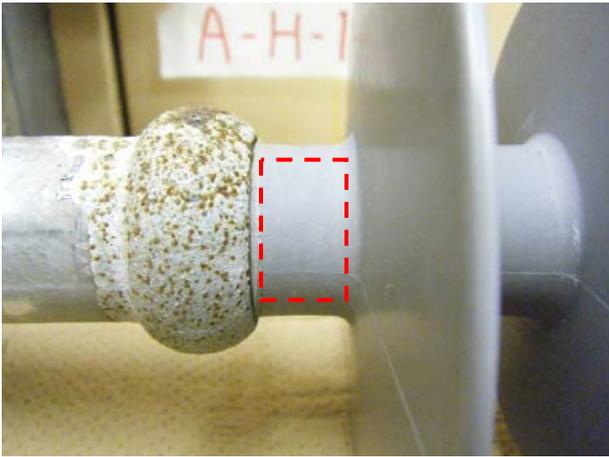
4.3.2 FT-IR による組成分析結果

4.3.2.1 EVA 系引留め碍子

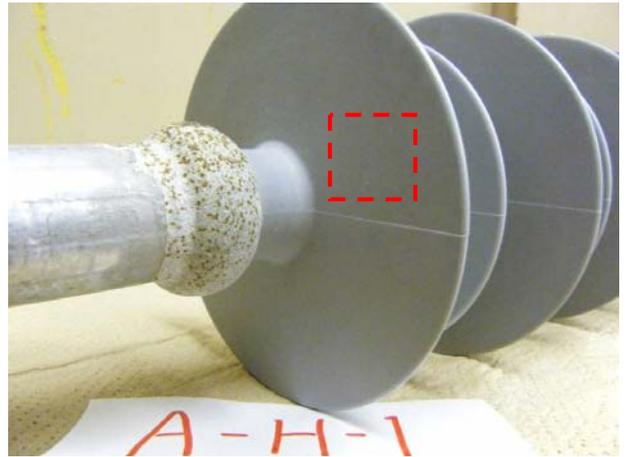
各碍子の外被材料を切り取り，FT-IR を用いて組成分析を行った。分析は図 4.24～図 4.27 中の赤枠で示した，接地側胴部，接地側笠表面，中央胴部，課電側笠トラッキング部，課電側笠カバー内部，課電側胴部に関して行い，それぞれ新品 EVA 碍子の分析結果と比較した。なお，図 4.26 及び図 4.27 中のトラッキング周辺については，トラッキングの領域が小さすぎたため分析できなかった。

図 4.28～図 4.31 に A-H-1, A-H-2, A-H-3, A-H-6 で得られた FT-IR のスペクトル及びピーク毎の新品 EVA 碍子に対する強度をそれぞれ示す。図 4.28～図 4.31 内の各記号 (a) ～ (f) はそれぞれ図 4.24～図 4.27 内の各記号と対応している。同図内で強度を示している C-H 基及び C-O 基は，図 4.32 の化学構造に示されているように，EVA の側鎖を担っている。また，C=C 基は，化学構造に含まれていないが，主鎖である C-C 結合が外的要因によって切断されて生成されたものである。このような主鎖が切断されて C=C 基に置き換わることによる架橋密度の低下で劣化が進行するとされている⁽¹⁹⁾。O-H 基についても化学構造内に含まれないが，外被の充填剤として用いられている三水和アルミナ (ATH: Alumina tri hydrate) 中に存在する官能基である。つまり，図 4.28～図 4.32 中に示す C=C 基の強度が大きいほど劣化の度合いが大きく，逆に，C-H 基及び C-O 基の強度が大きいほど劣化の度合いが小さいことを示している。また，O-H 基が大きいほど，放電等の外的要因によって外被材料内部の充填剤が表面に露出していることを示している。それぞれの図から，まず劣化が顕著なのは A-H-1, A-H-2 の課電側笠部のトラッキング

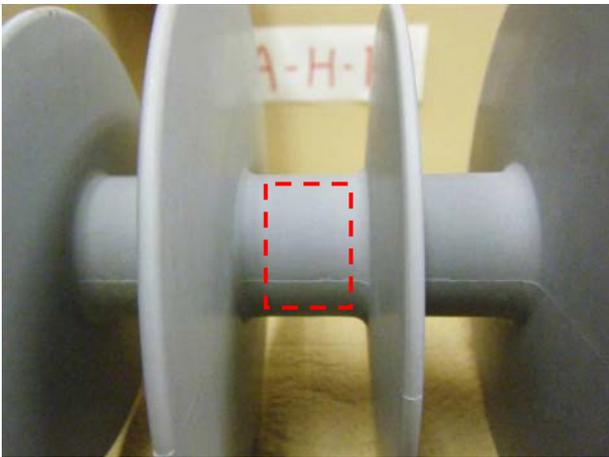
箇所であることが分かる。両試料ともにトラッキング箇所のスペクトル強度が非常に小さいことが分かる。この結果から、この箇所においては放電によって外被表面の無機化（炭化）が進んでいると考えられる。次に劣化が進行しているのは、C=C が生成された割合が大きいことから、課電側の胴部及び笠部と中央胴部であると考えられる。特に課電側胴部については、どの試料においても非常に大きなピークが見られた。この原因としては、課電側は使用中常にカバーに覆われていることから汚損物質が溜まりやすく、また課電状態にあることで放電による影響を受けやすかったためであると考えられる。また、C-O 基について、新品で得られたピークを大きく上回っている箇所が数ヶ所存在するが、これは、大気中の水分等による酸化によって生成されたものであると思われる。ATH に起因する O-H 基については全体的に新品とほぼ同程度であるが、胴部において新品の 2 倍から 3 倍程度の強度が検出されている箇所もあった。この原因としては、塩霧試験の傾向にも見られたように、実環境においても碍子上での放電が比較的胴部に集中しやすかったためではないかと考えられる。



(a) 接地側胴部



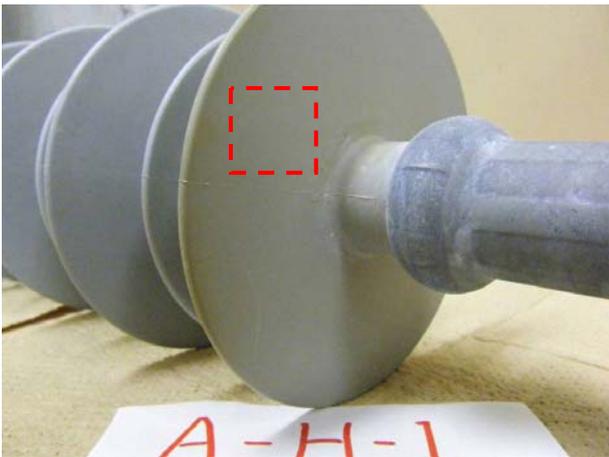
(b) 接地側笠表面



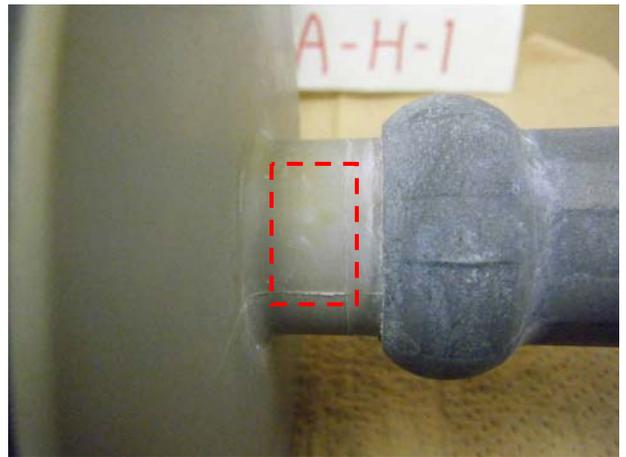
(c) 中央胴部



(d) 課電側笠トラッキング周辺

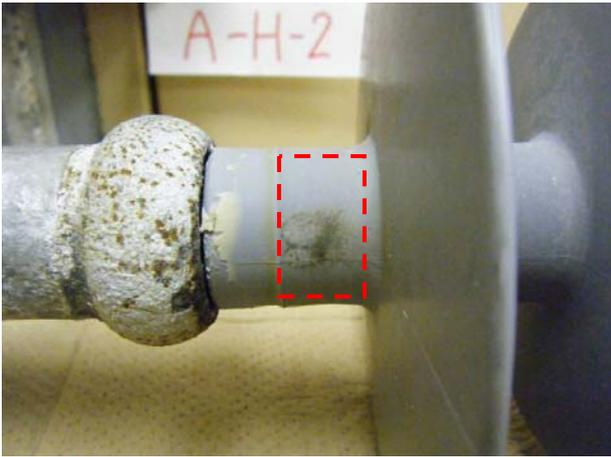


(e) 課電側笠カバー内部

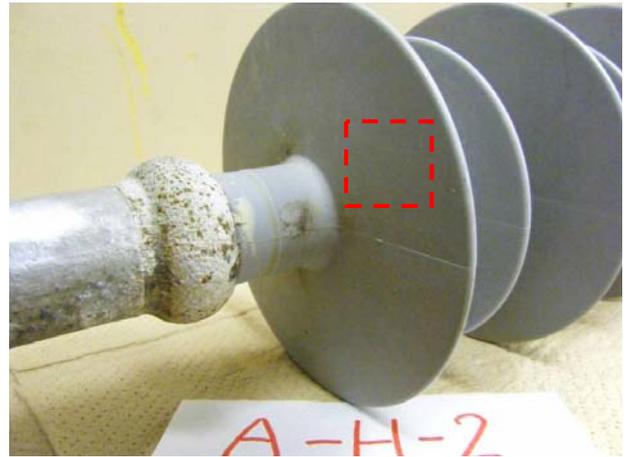


(f) 課電側胴部

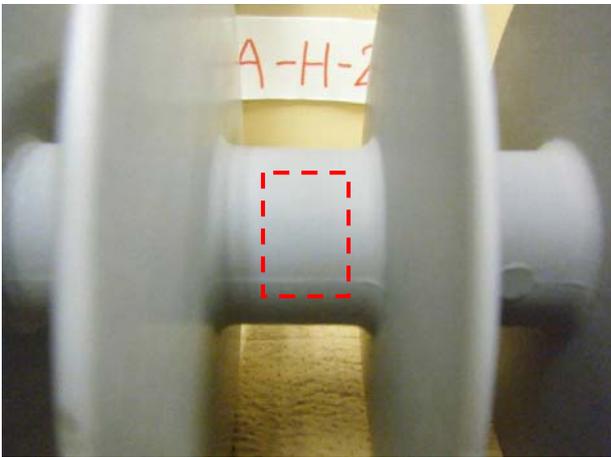
図 4.24 分析箇所説明図 (A-H-1)



(a) 接地側胴部



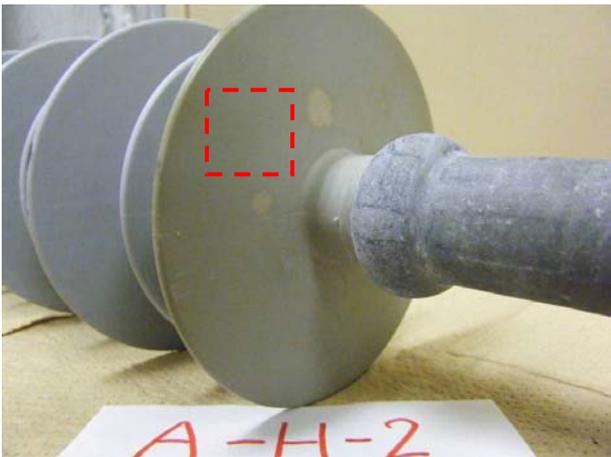
(b) 接地側笠表面



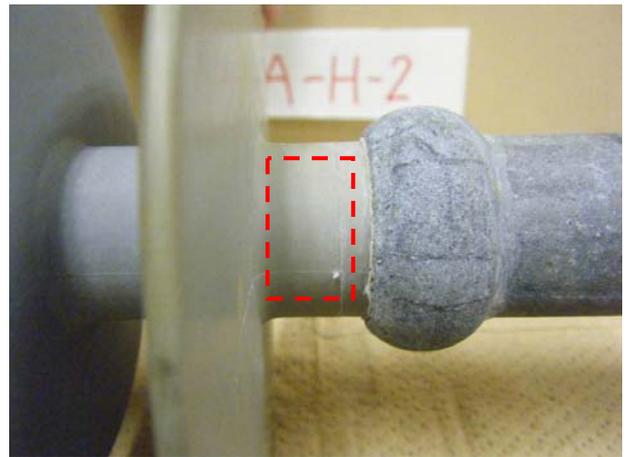
(c) 中央胴部



(d) 課電側笠トラッキング周辺

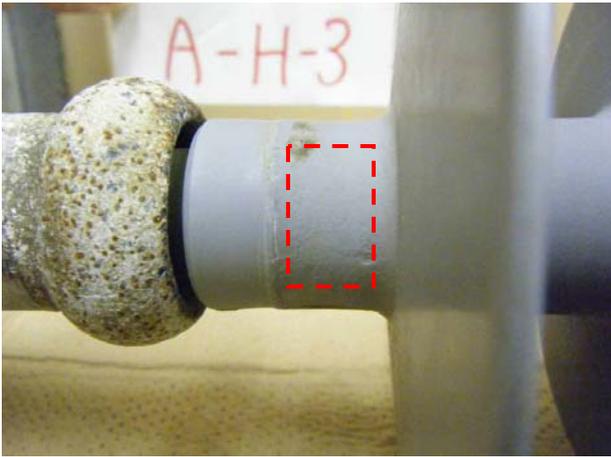


(e) 課電側笠カバー内部

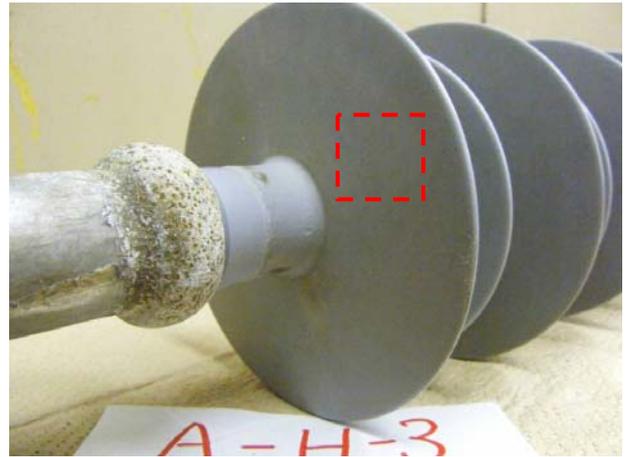


(f) 課電側胴部

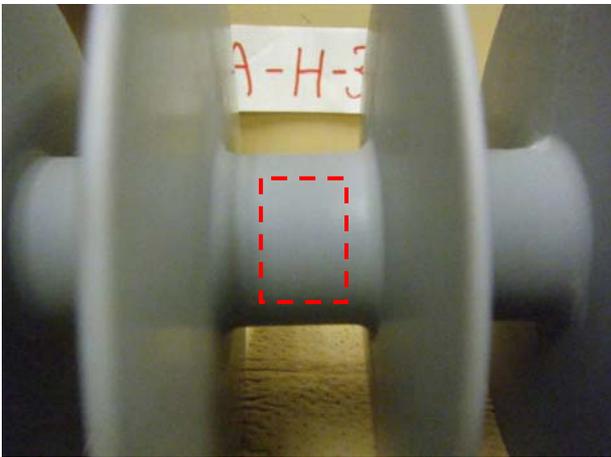
図 4.25 分析箇所説明図 (A-H-2)



(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



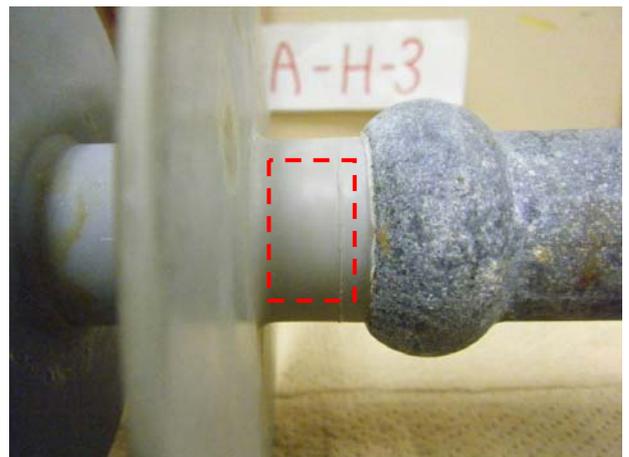
(c) 中央胴部



(d) 課電側笠トラッキング周辺 (分析不可)

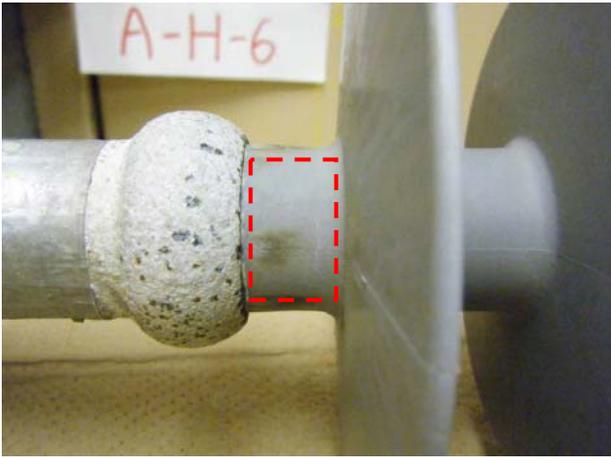


(e) 課電側笠カバー内部

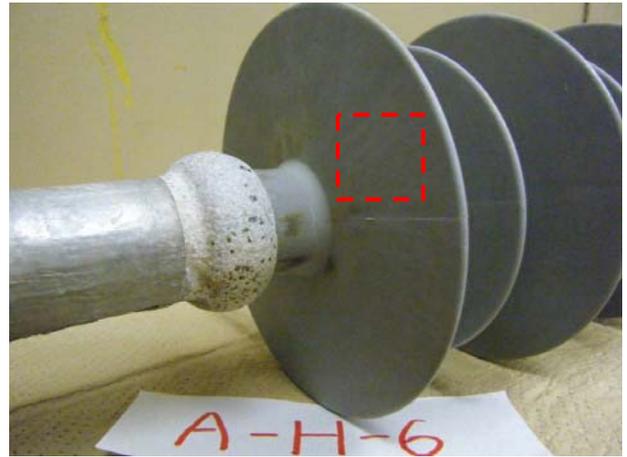


(f) 課電側胴部

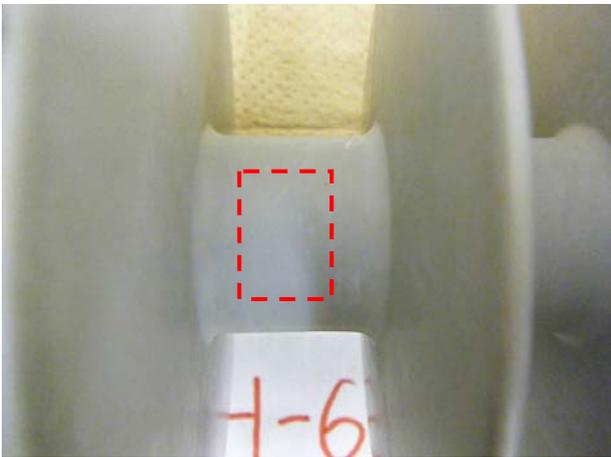
図 4.26 分析箇所説明図 (A-H-3)



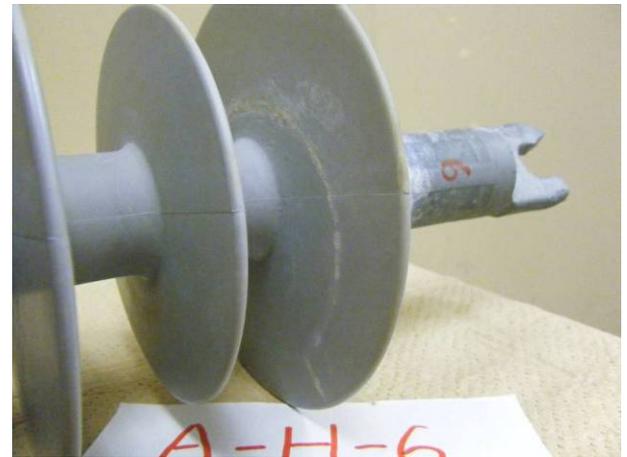
(a) 接地側胴部



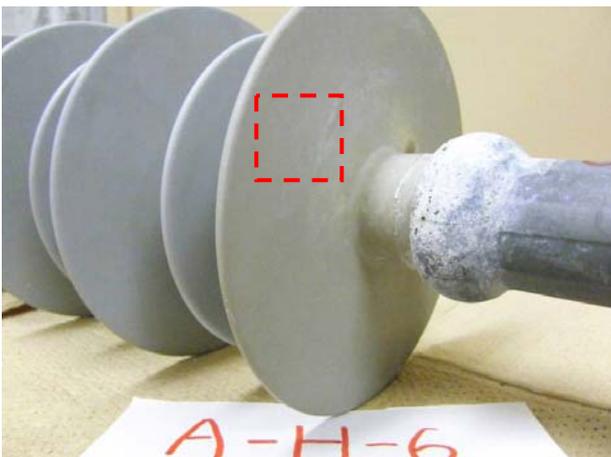
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠トラッキング周辺 (分析不可)



(e) 課電側笠カバー内部



(f) 課電側胴部

図 4.27 分析箇所説明図 (A-H-6)

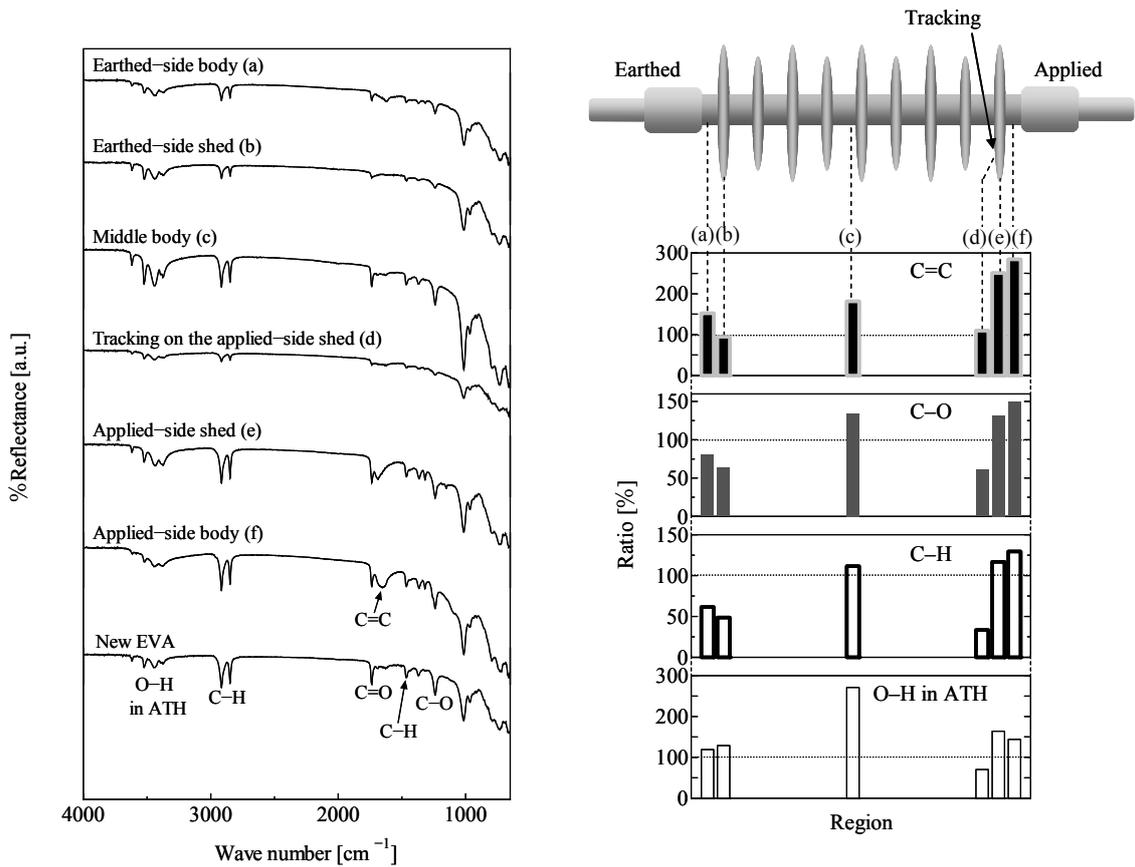


図 4.28 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の新品に対する強度 (右) (A-H-1)

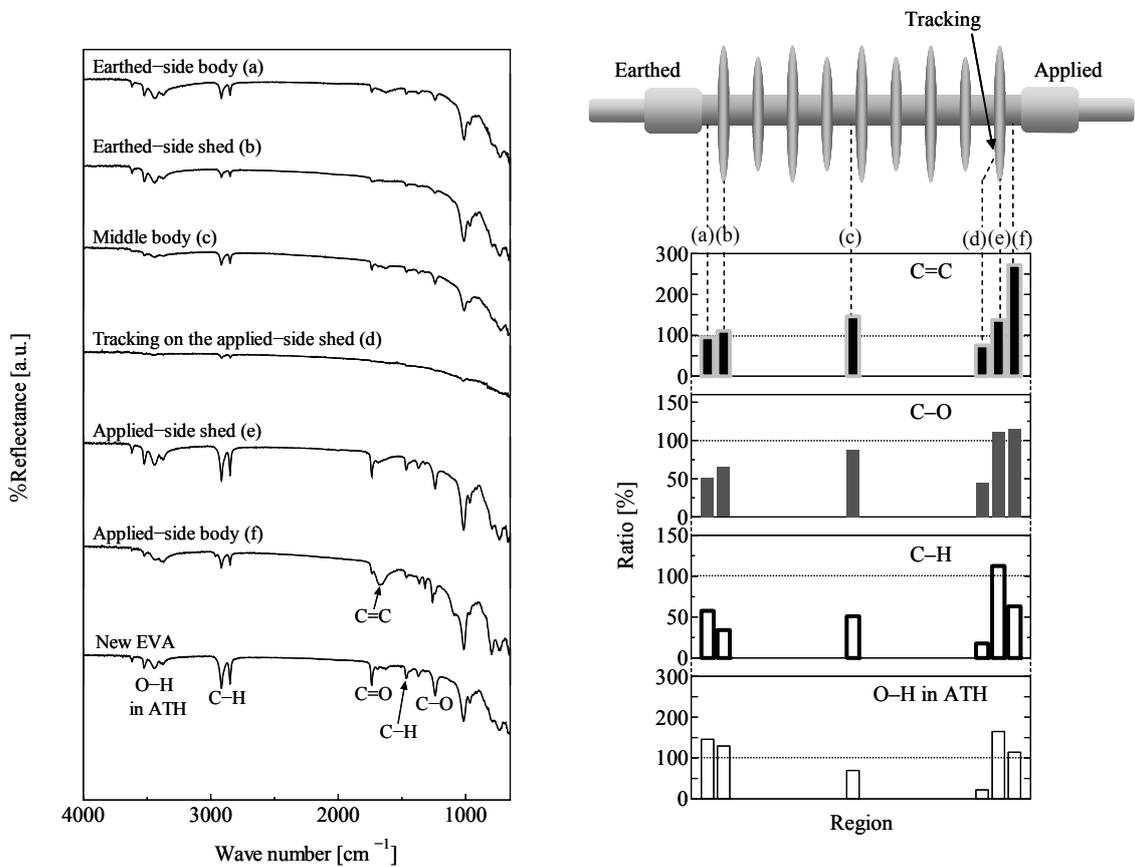


図 4.29 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の新品に対する強度 (右) (A-H-2)

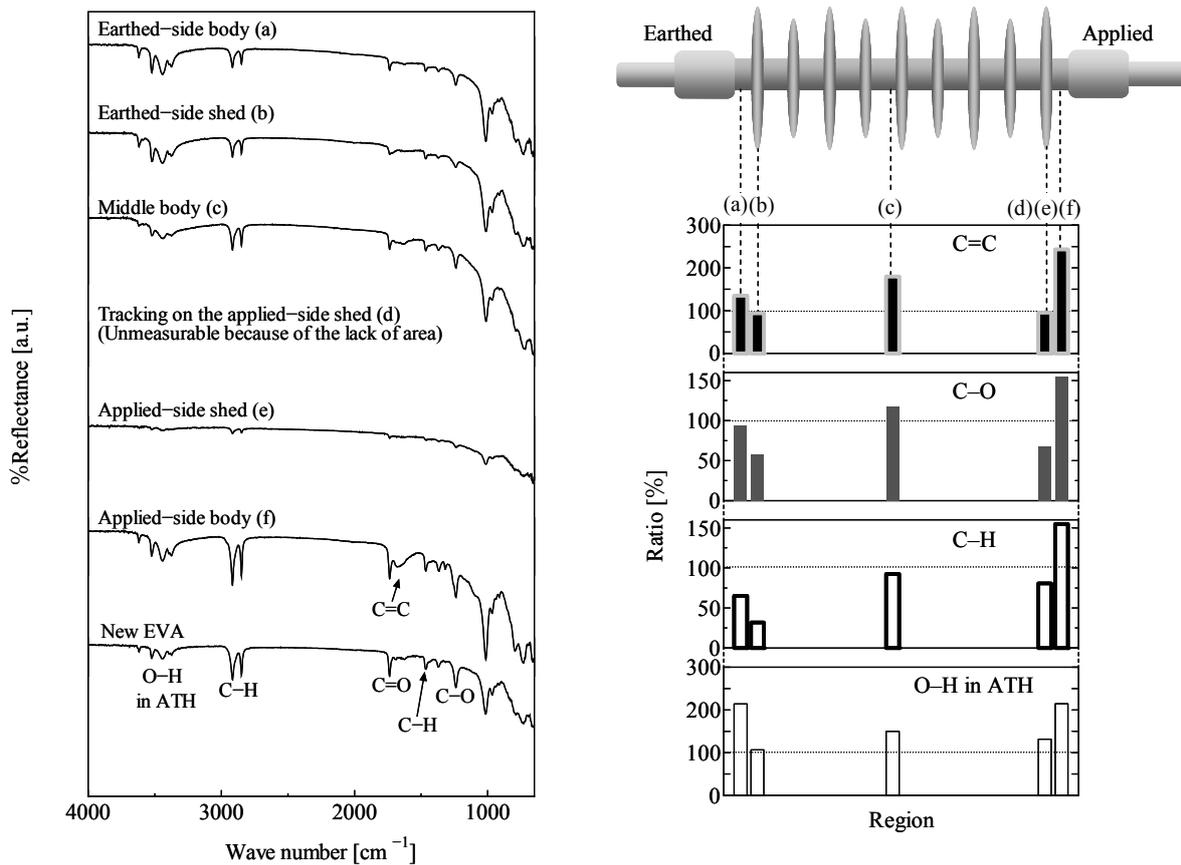


図 4.30 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の新品に対する強度 (右) (A-H-3)

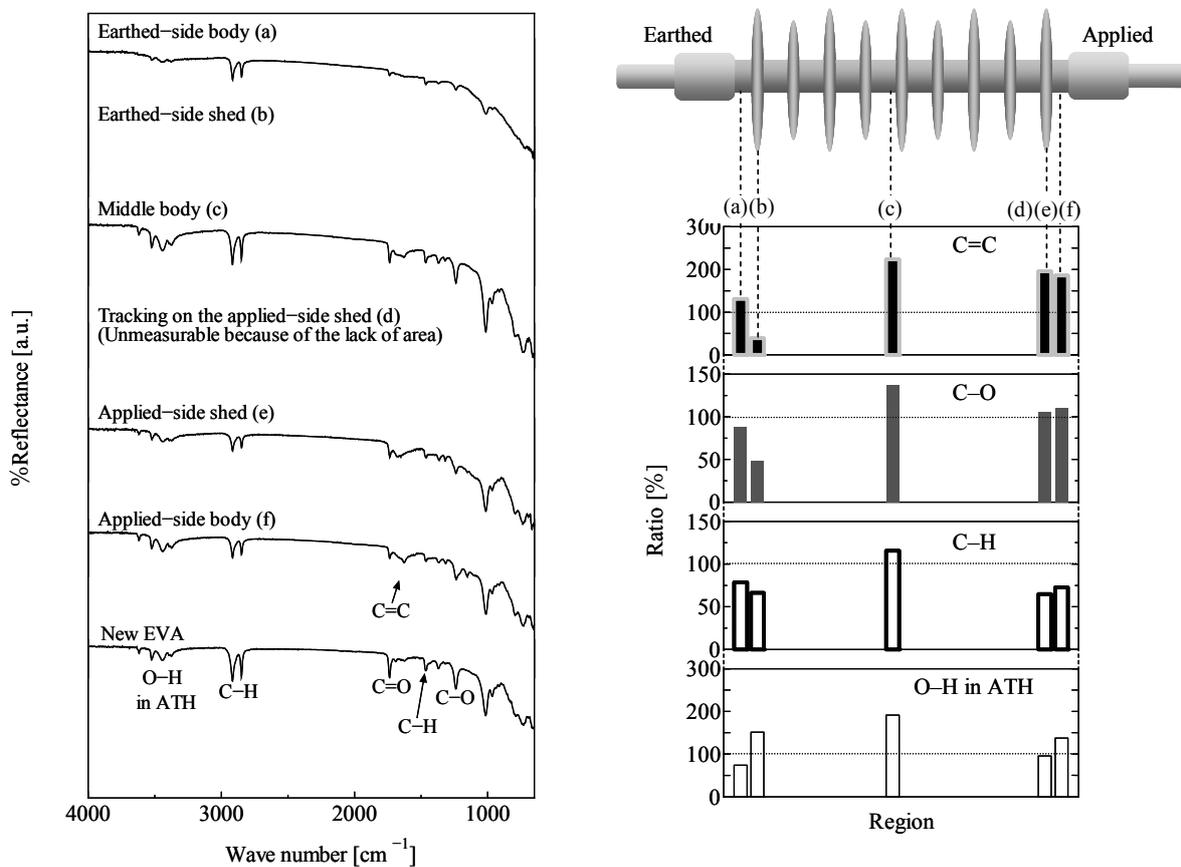


図 4.31 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の新品に対する強度 (右) (A-H-6)

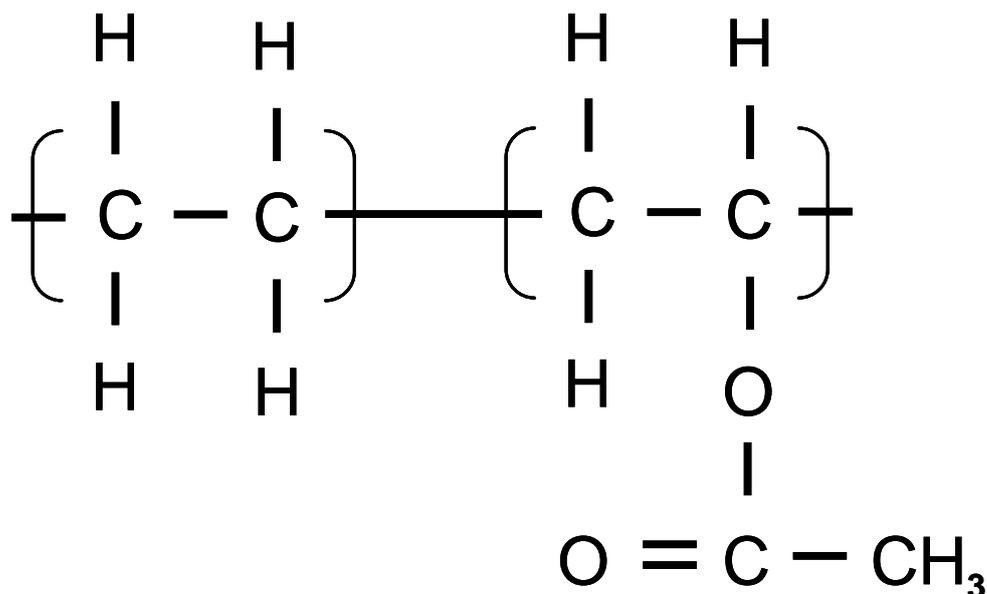
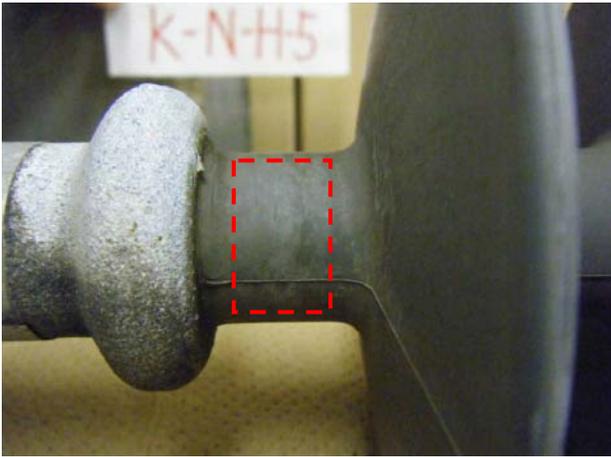


図 4.32 EVA の化学構造

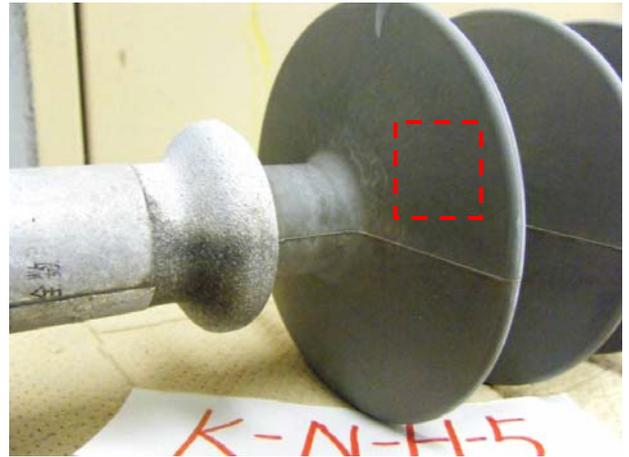
4.3.2.2 SiR 系引留め碍子

各碍子の外被材料を切り取り，FT-IR を用いて組成分析を行った。分析は図 4.33 に示すように，接地側胴部，接地側笠表面，中央胴部，課電側笠表面，課電側胴部に関して行い，それぞれ SiR 碍子新品の分析結果と比較した。また，図 4.33 には K-N-H-5 の分析箇所のみ示しているが，その他の碍子の分析箇所については K-N-H-5 とほとんど同じ様相であったため割愛した。

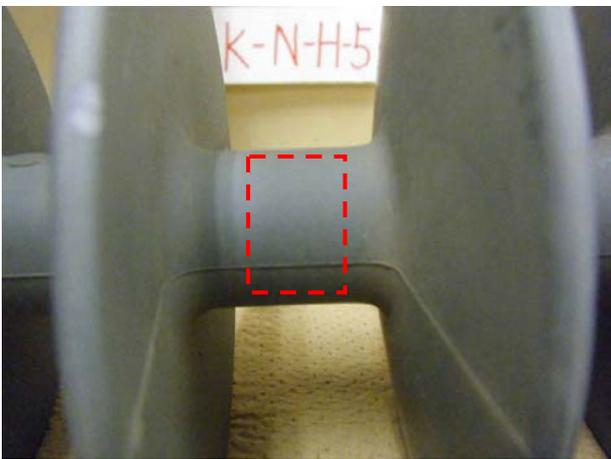
図 4.34～図 4.37 に K-N-H-1，K-N-H-2，K-N-H-3，K-N-H-5 で得られた FT-IR のスペクトル及びピーク毎の SiR 碍子新品に対する強度をそれぞれ示す。同図内で強度を示している Si-O-Si 基及び Si-CH₃ 基は図 4.38 の化学構造に示されているように，SiR の主鎖及び側鎖をそれぞれ担っている。また，O-H 基は化学構造内には存在しないが，外被の充填剤として用いられている ATH 中に存在する官能基である。つまり，図 4.34～図 4.37 中に示す Si-O-Si 基及び Si-CH₃ 基の強度が大きいほど劣化の度合いが小さいことを示している。特に Si-CH₃ 基についてはメチル基と呼ばれ，シリコーンの撥水性を担う官能基であることから，SiR の特性を維持する上で非常に重要な役割を担っていると言える。一方，O-H 基が大きいほど，放電等の外的要因によって外被材料内部の充填剤が表面に露出していることを示している。それぞれの図から，いずれの試料においても全体的に Si-O-Si 基が若干低下していることが分かる。これは，全体的に若干の主鎖の切断が起こっていることを表している。また，Si-CH₃ 基については，4 つの試料のほとんどの箇所で新品の 70%前後までの低下が確認された。しかし，4.3.1 項の塩霧試験の結果で述べたように，SiR 系引留め碍子は 10 年前後の実環境での使用後も十分な耐汚損性能が確認されており，この程度の Si-CH₃ 基の低下は，碍子の耐汚損性能にほとんど影響しないことが示された。



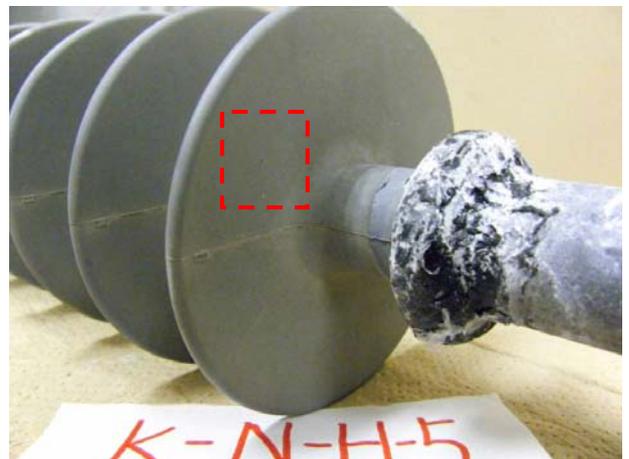
(a) 接地側胴部



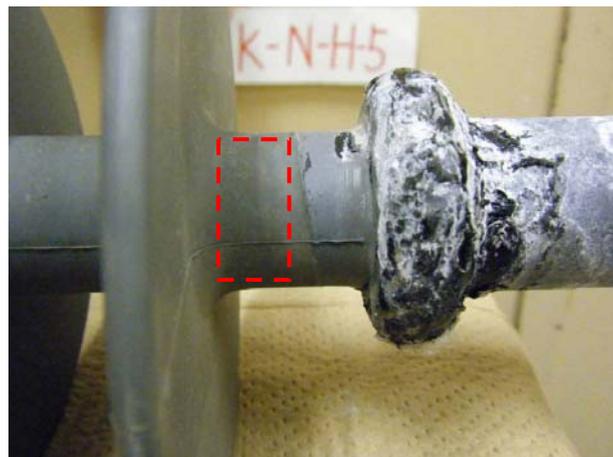
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

図 4.33 分析箇所説明図 (K-N-H-5)

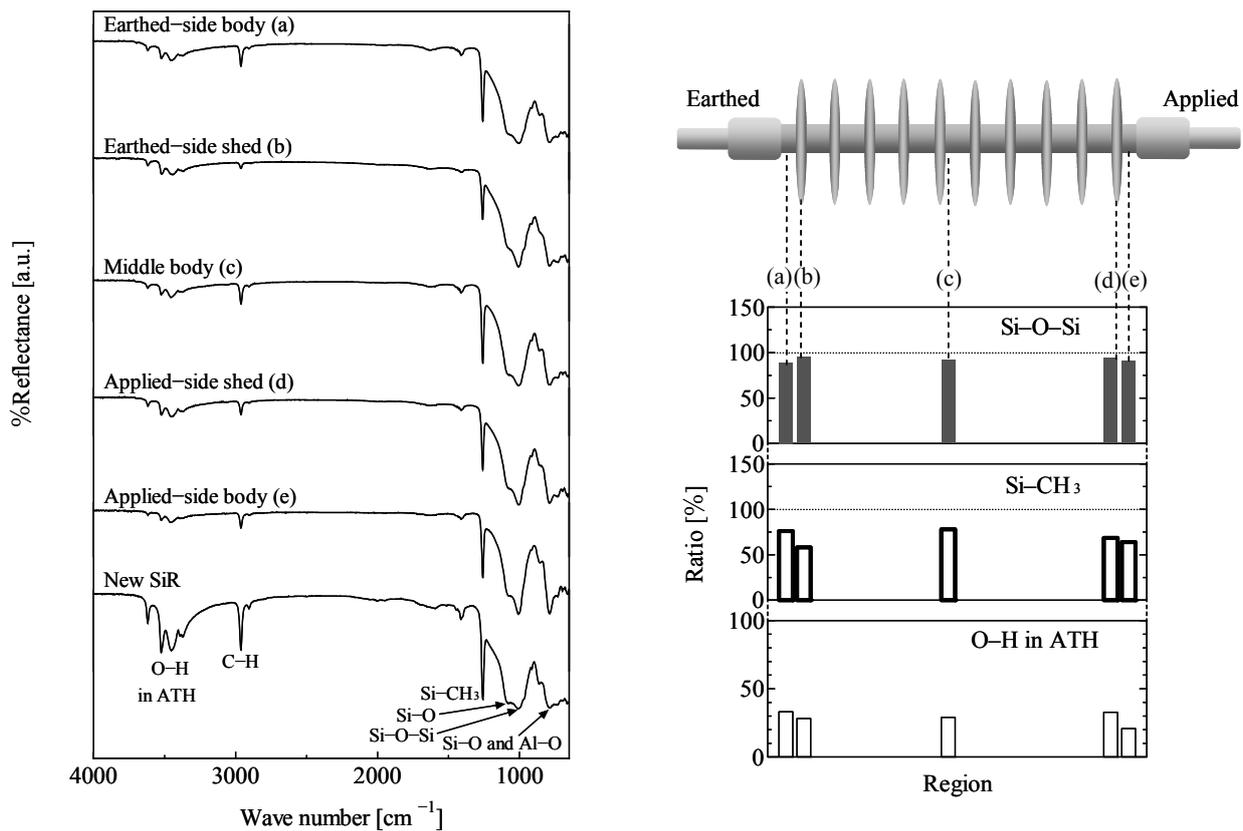


図 4.34 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の笠内部に対する強度 (右) (K-N-H-1)

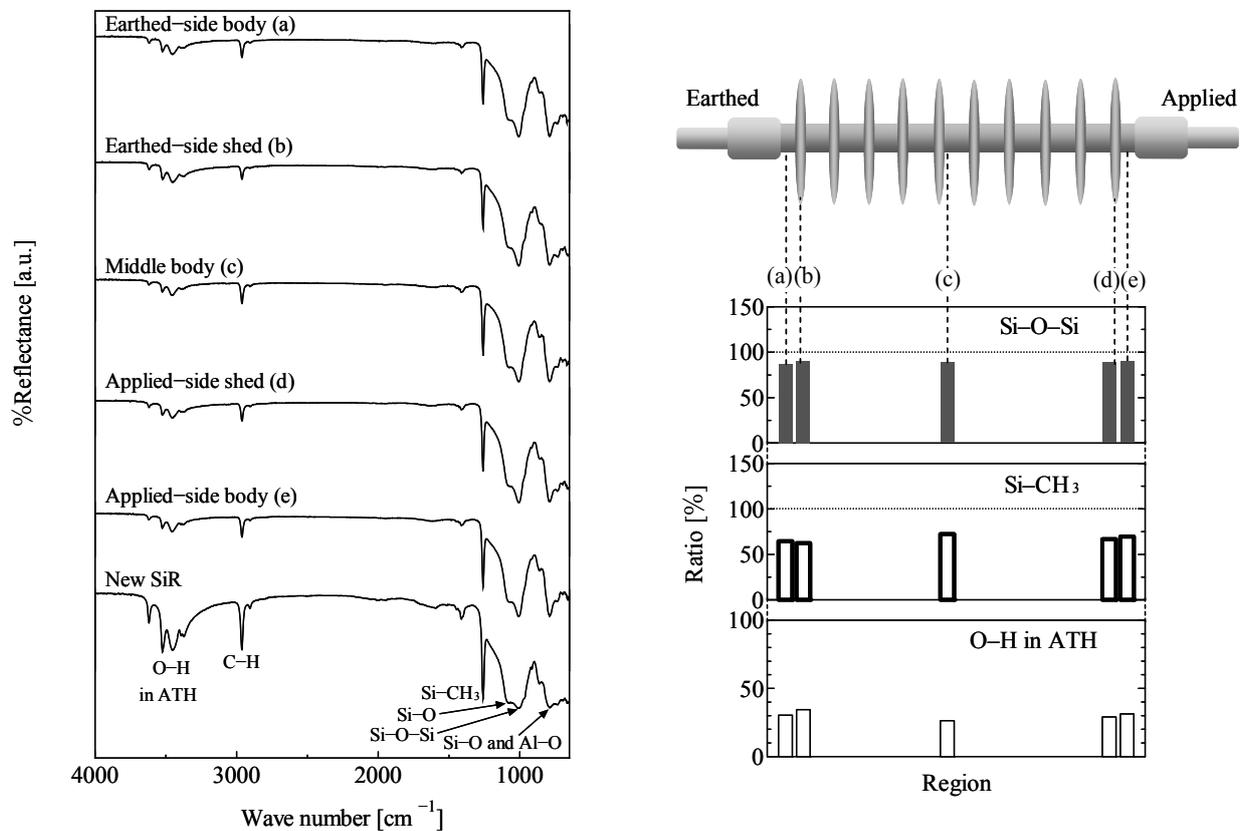


図 4.35 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の笠内部に対する強度 (右) (K-N-H-2)

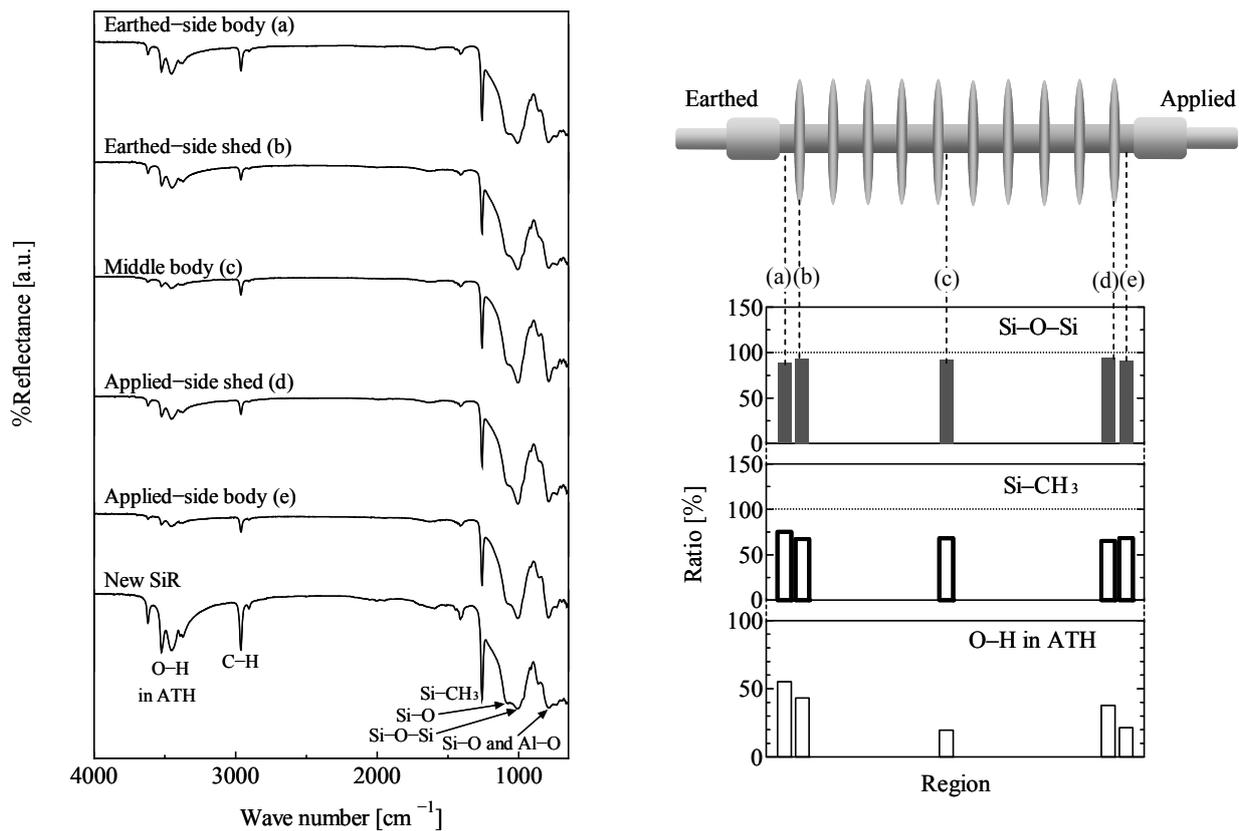


図 4.36 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の笠内部に対する強度 (右) (K-N-H-3)

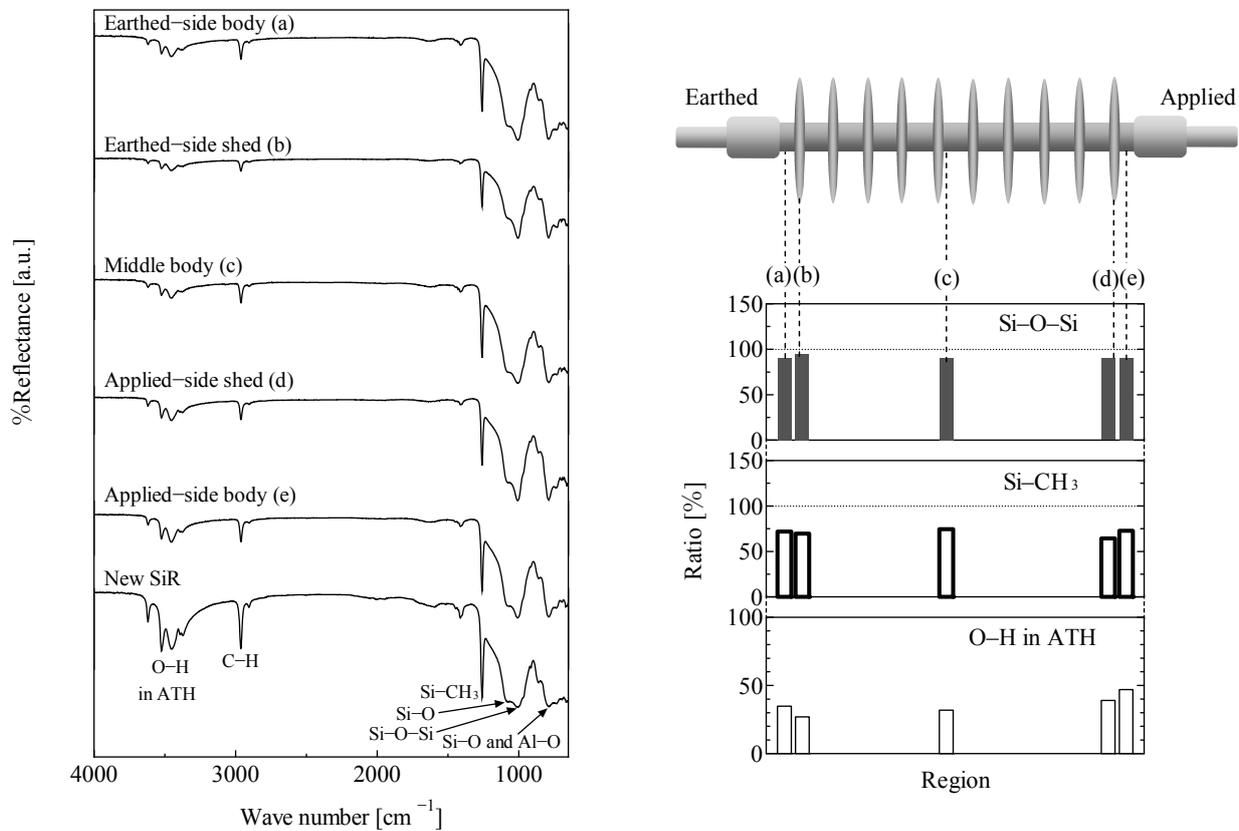


図 4.37 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の笠内部に対する強度 (右) (K-N-H-5)

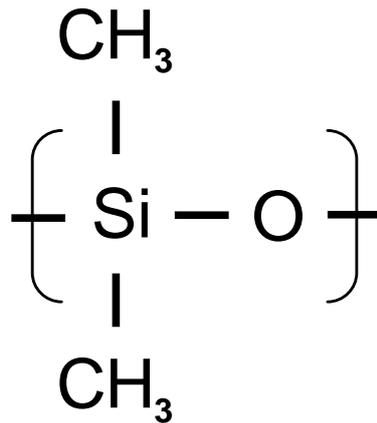
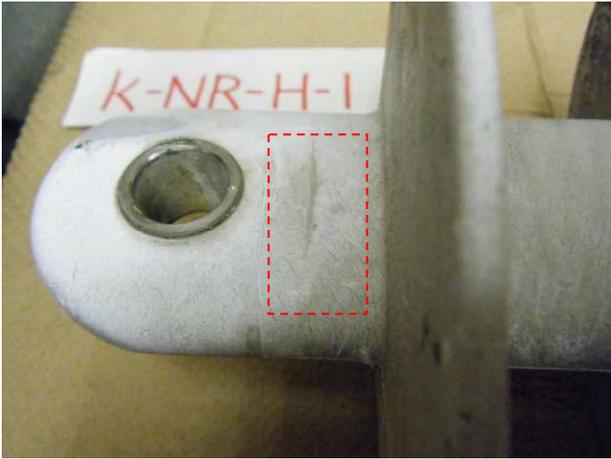


図 4.38 SiR の化学構造

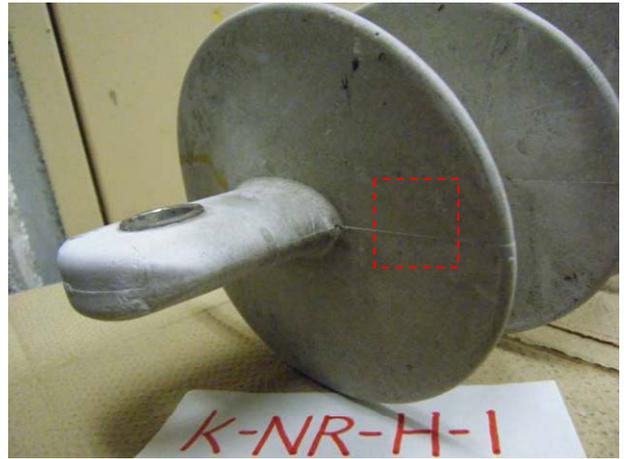
4.3.2.3 SiR 系引留め碍子 A (レーストラック)

各碍子の外被材料を切り取り，FT-IR を用いて組成分析を行った。分析は図 4.39～図 4.41 に示すように，接地側胴部，接地側笠表面，中央胴部，課電側笠表面，課電側胴部に関して行い，それぞれ碍子笠内部の分析結果と比較した。

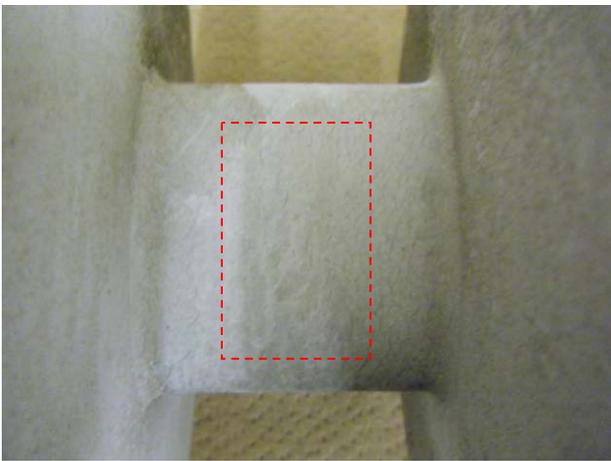
図 4.42～図 4.44 に K-NR-H-1，K-NR-H-2，K-NR-H-3 で得られた FT-IR のスペクトル及びピーク毎の SiR 碍子新品に対する強度をそれぞれ示す。図 4.42～図 4.44 内の各記号 (a) ～ (f) はそれぞれ図 4.39～図 4.41 内の各記号と対応している。これらの試料は 4.3.2.1 で示したものと同様に SiR 系であり，同図内で強度を示している Si-O-Si 基，Si-CH₃ 基及び O-H 基についても K-N-H シリーズのそれらと同様である。すなわち，Si-O-Si 基及び Si-CH₃ 基の強度が大きいほど劣化の度合いが小さく，O-H 基が大きいほど，放電等の外的ストレスによって外被材料内部の充填剤が表面に露出していることを示している。図から，全ての試料において全体的に Si-O-Si 基が新品の 70～90%程度まで低下していることが分かる。これは，主鎖の切断が起こっていることを表している。また，Si-CH₃ 基については，3 つの試料のほとんどの箇所では新品の 50%以下までの低下が確認された。さらに，同試料を用いて行った塩霧試験においては，試料の撥水性はほとんど残っていなかった。このことから，Si-CH₃ 基の 50%以下への低下は試料の撥水性に影響を及ぼすことが示された。また，これらの試料に関しては，SiR としての特性はほとんど失われていると言える。



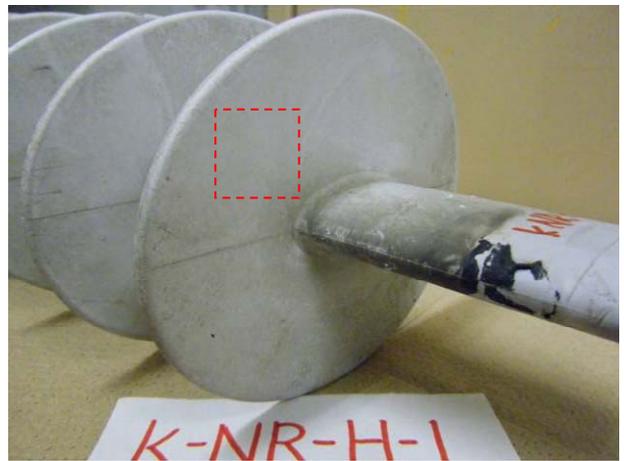
(a) 接地側胴部



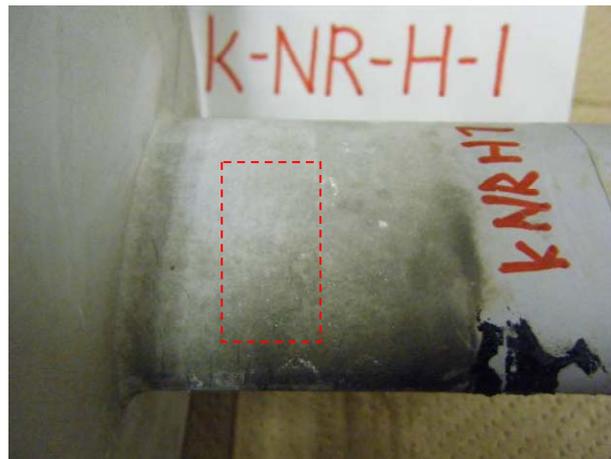
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部

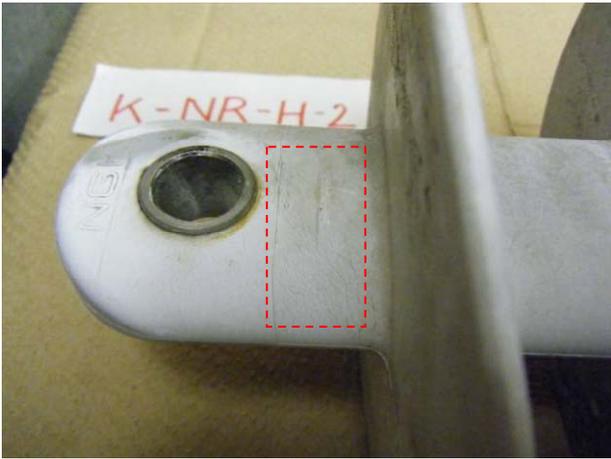


(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

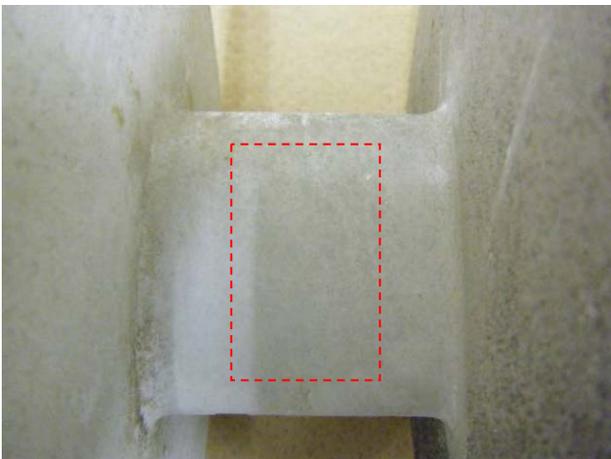
図 4.39 分析箇所説明図 (K-NR-H-1)



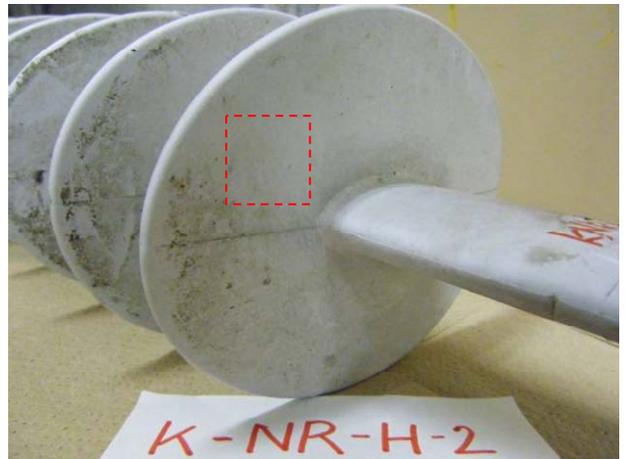
(a) 接地側胴部



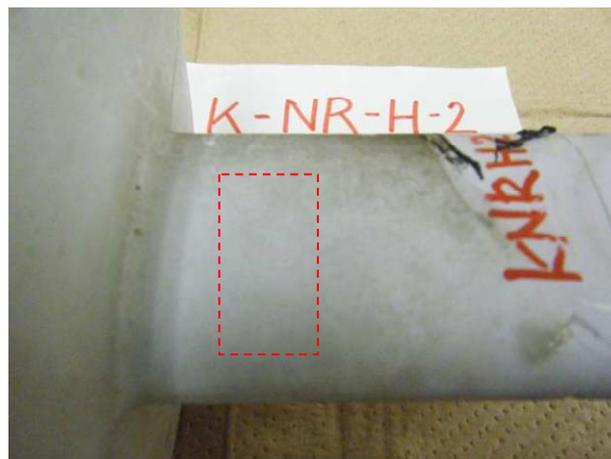
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面

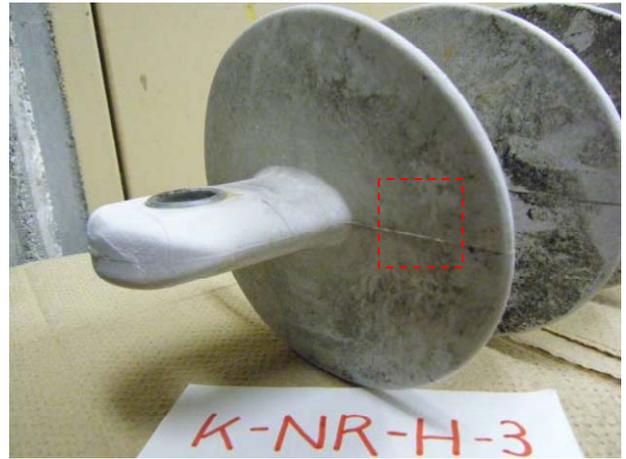


(e) 課電側胴部

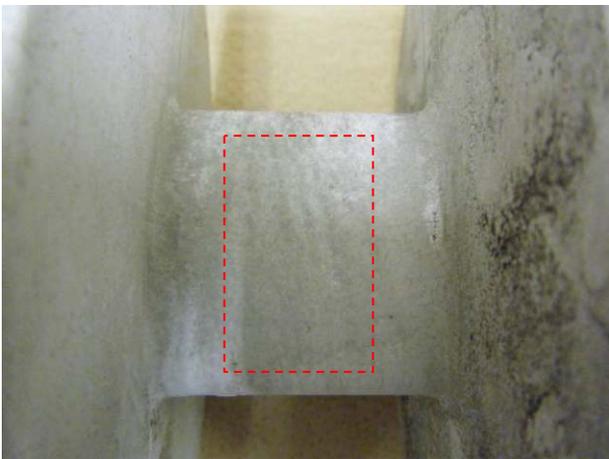
図 4.40 分析箇所説明図 (K-NR-H-2)



(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

図 4.41 分析箇所説明図 (K-NR-H-3)

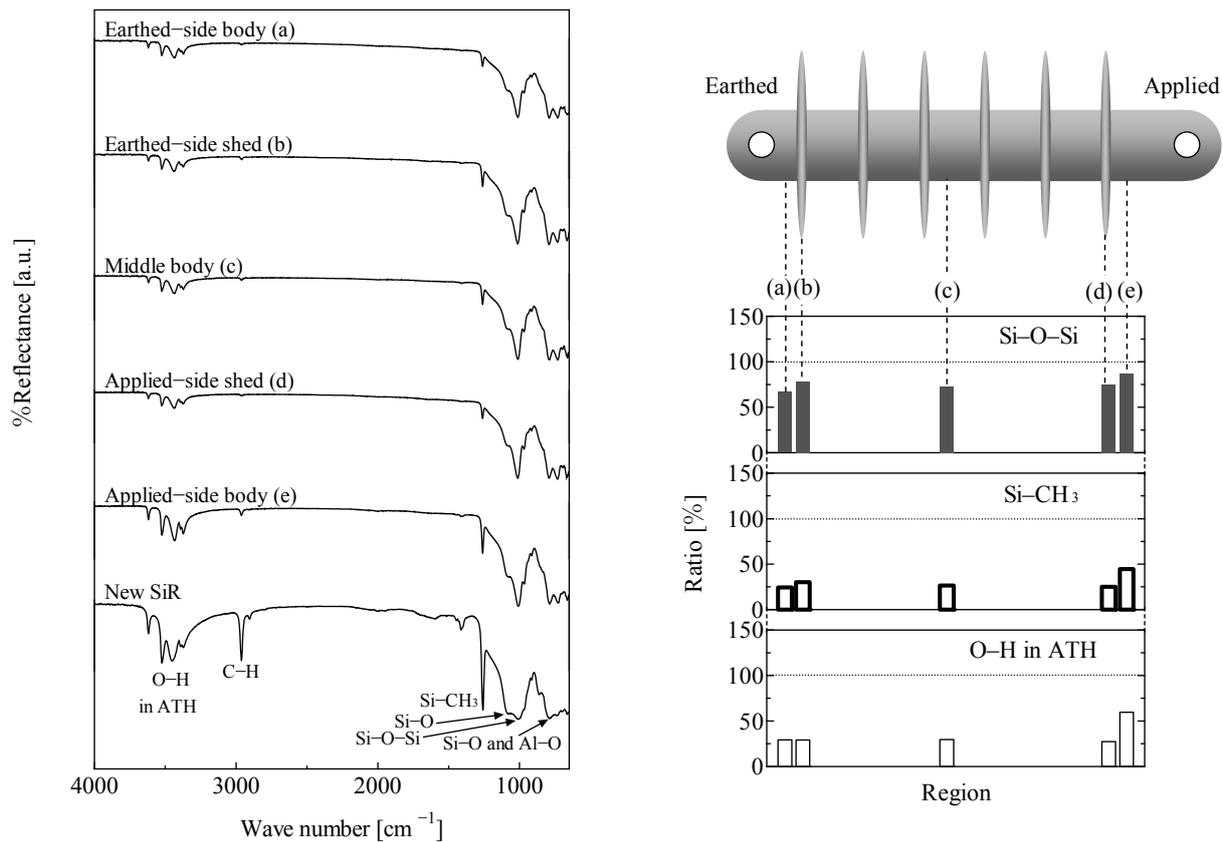


図 4.42 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の筐内部に対する強度 (右) (K-NR-H-1)

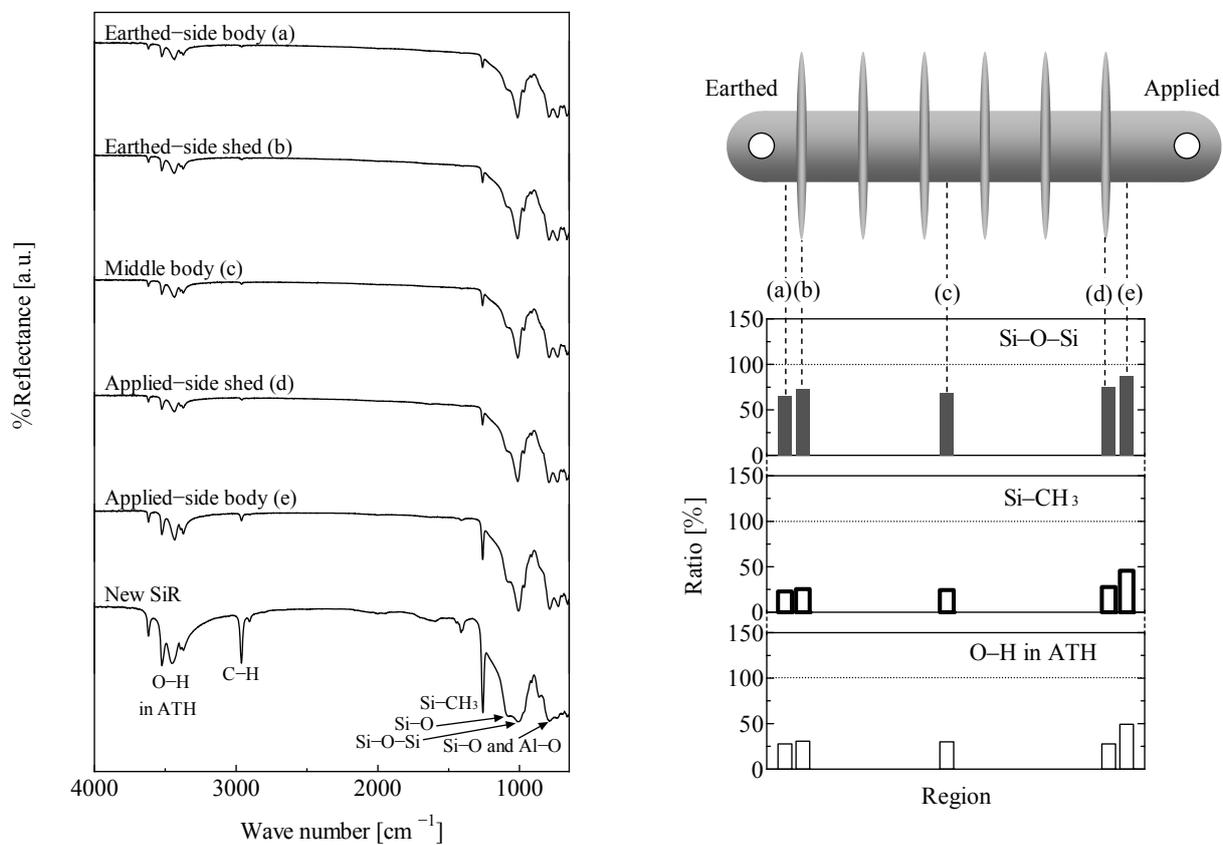


図 4.43 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の筐内部に対する強度 (右) (K-NR-H-2)

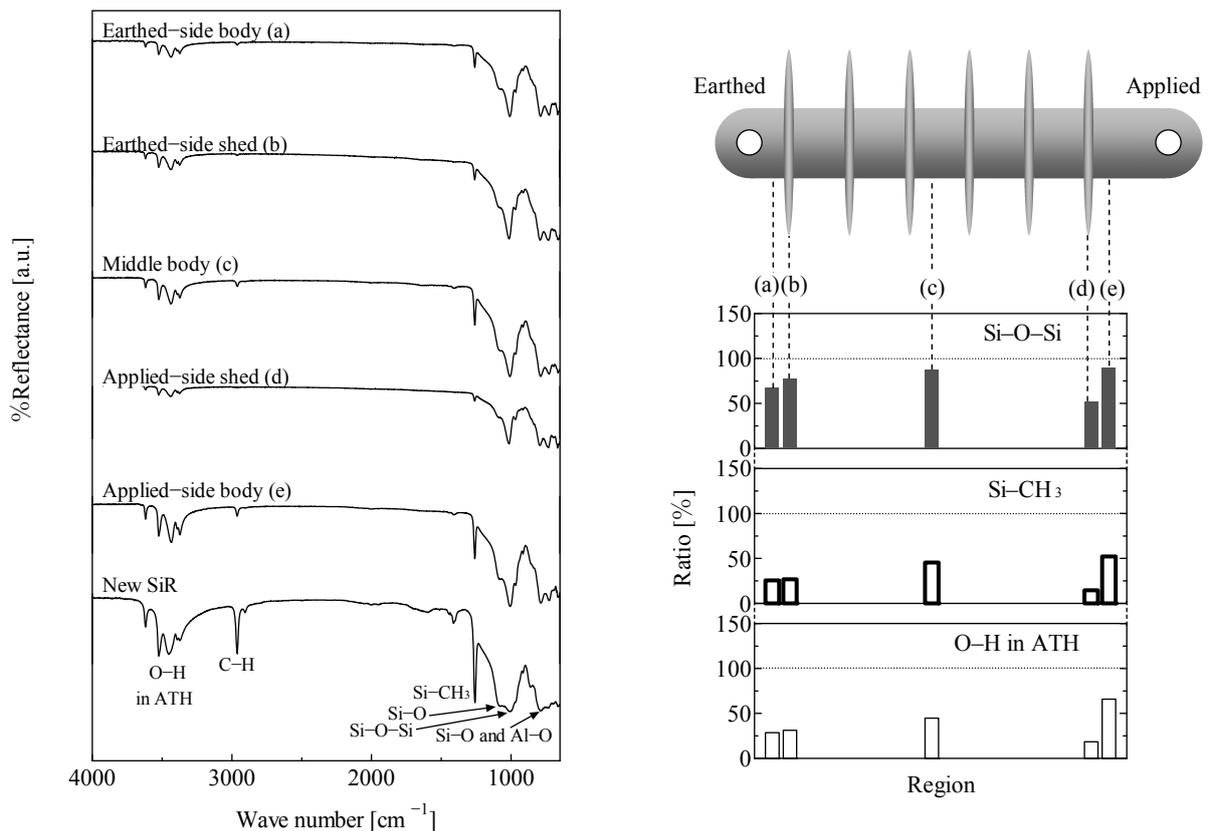


図 4.44 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の笠内部に対する強度 (右) (K-NR-H-3)

4.3.2.4 SiR 系引留め碍子 B (レーストラック)

各碍子の外被材料を切り取り、FT-IR を用いて組成分析を行った。分析は図 4.45～図 4.47 に示すように、接地側胴部、接地側笠表面、中央胴部、課電側笠表面、課電側胴部に関して行い、それぞれ SiR 碍子新品の分析結果と比較した。

図 4.48～図 4.50 に K-M-H-1, K-M-H-5, K-M-H-6 で得られた FT-IR のスペクトル及びピーク毎の SiR 碍子新品に対する強度をそれぞれ示す。図 4.48～図 4.50 内の各記号 (a) ～ (f) はそれぞれ図 4.45～図 4.47 内の各記号と対応している。これらの試料は 4.3.2.2, 4.3.2.3 で示したものと同様に SiR 系であり、同図内で強度を示している Si-O-Si 基, Si-CH₃ 基及び O-H 基についても同様である。すなわち、Si-O-Si 基及び Si-CH₃ 基の強度が大きいほど劣化の度合いが小さく、O-H 基が大きいほど、放電等の外的ストレスによって外被材料内部の充填剤が表面に露出していることを示している。図から、全ての試料において、全体的に Si-O-Si 基が新品の 50～75%程度まで低下していることが分かる。これは、全体的に若干の主鎖の切断が起こっていることを表している。また、Si-CH₃ 基については、3 つの試料の全ての箇所です笠内部の 50%以下までの低下が確認された。さらに、同試料を用いて行った塩霧試験において、試料の撥水性はほとんど残っていなかった。このことから、Si-CH₃ 基の 50%以下への低下は試料の撥水性に

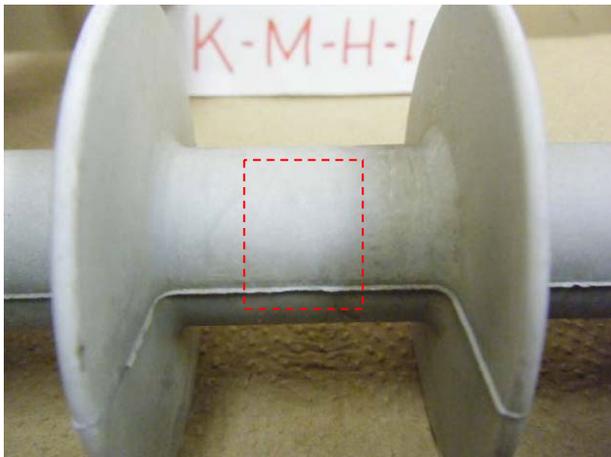
影響を及ぼすことが示された。また、これらの試料に関しては、SiR としての特性はほとんど失われていると言える。



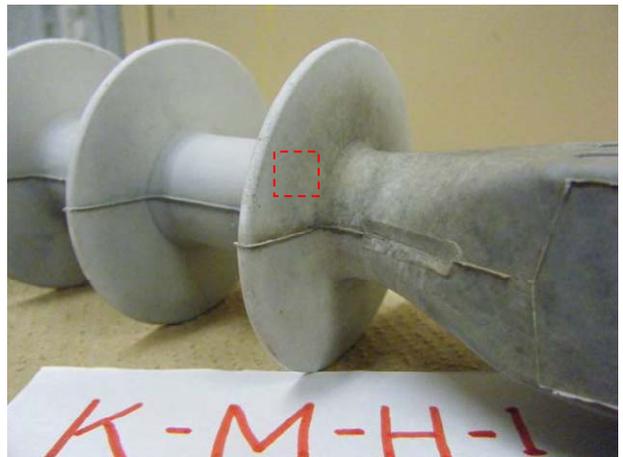
(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

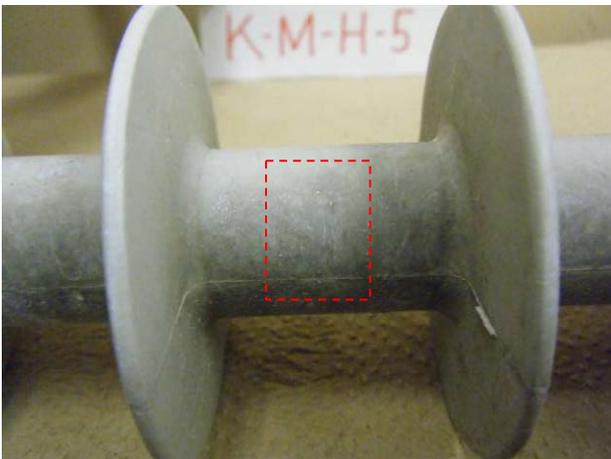
図 4.45 分析箇所説明図 (K-M-H-1)



(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面

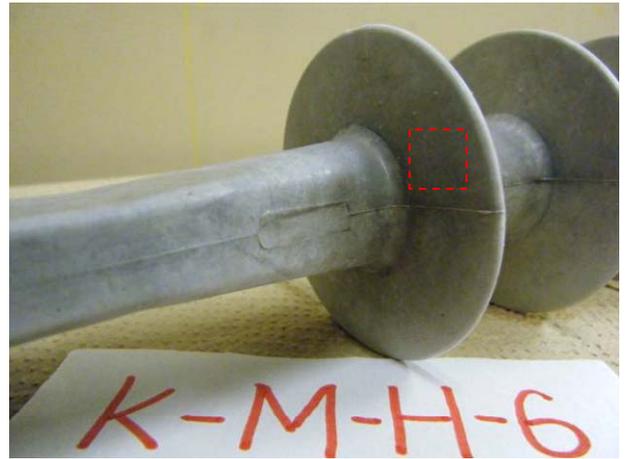


(e) 課電側胴部

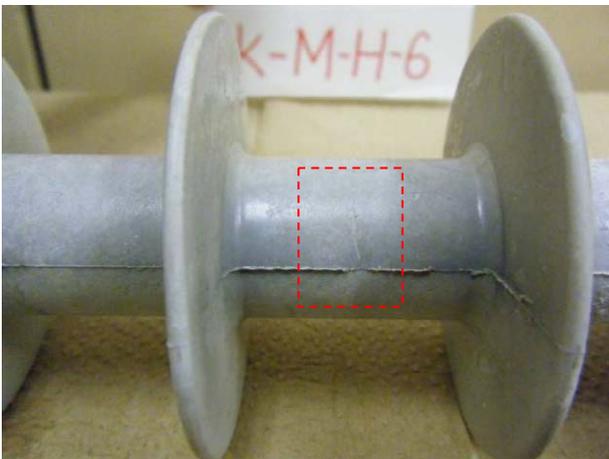
図 4.46 分析箇所説明図 (K-M-H-5)



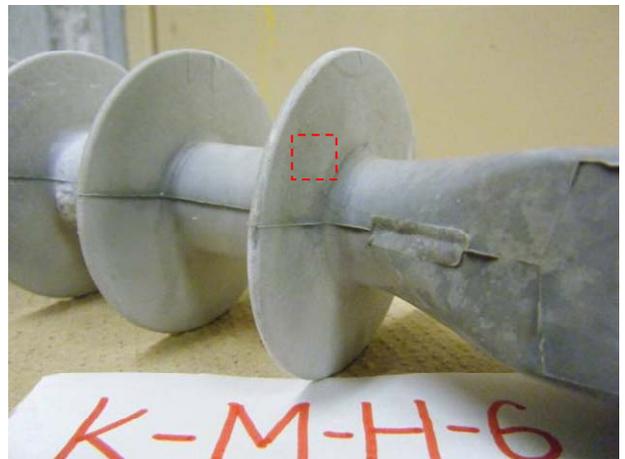
(a) 接地側胴部



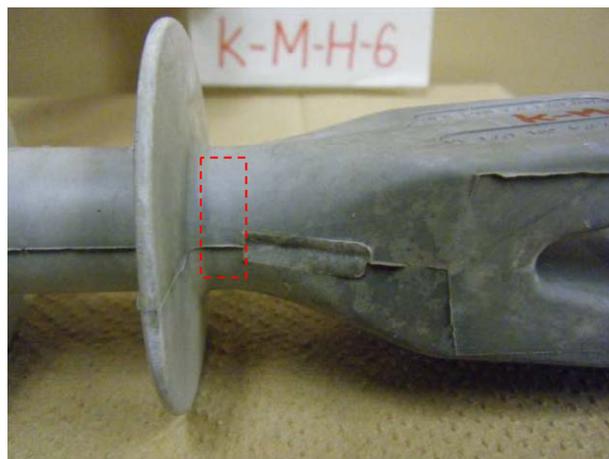
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

図 4.47 分析箇所説明図 (K-M-H-6)

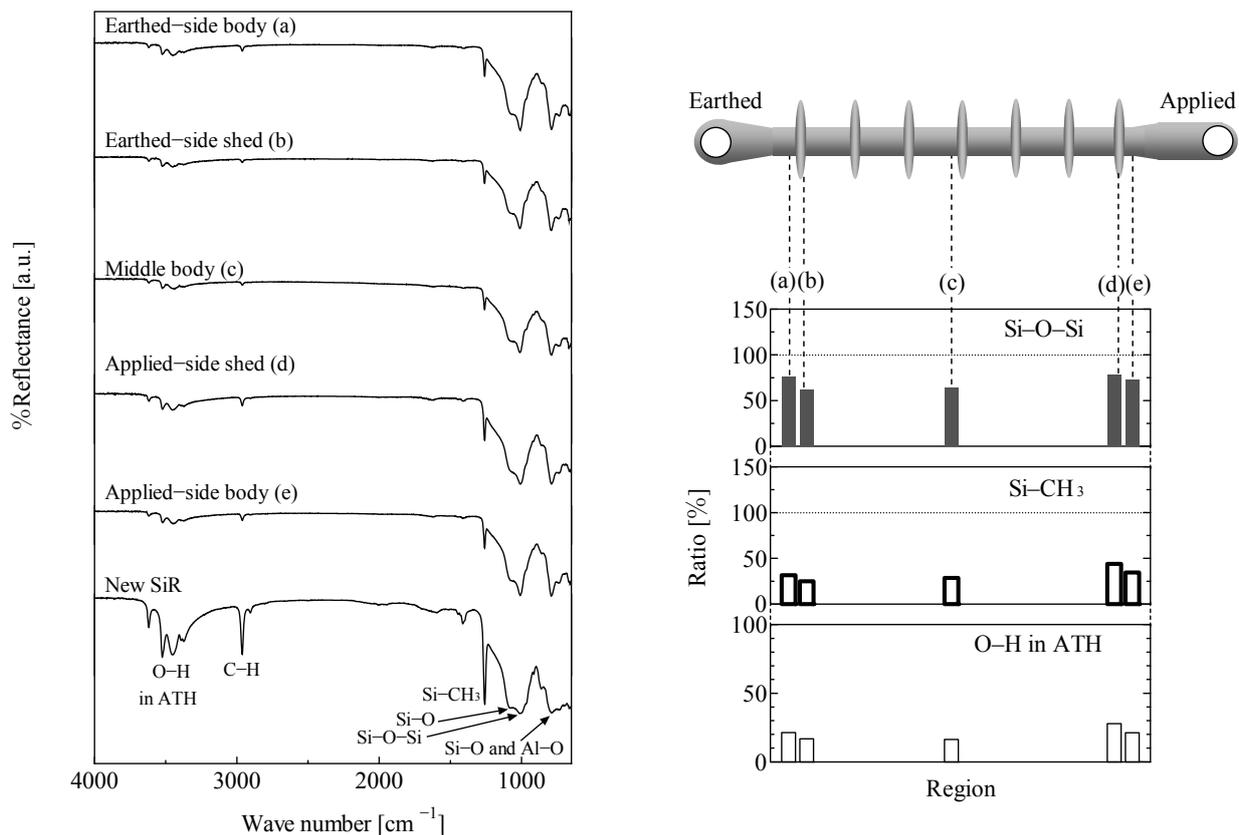


図 4.48 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の外被材料内部に対する強度 (右) (K-M-H-1)

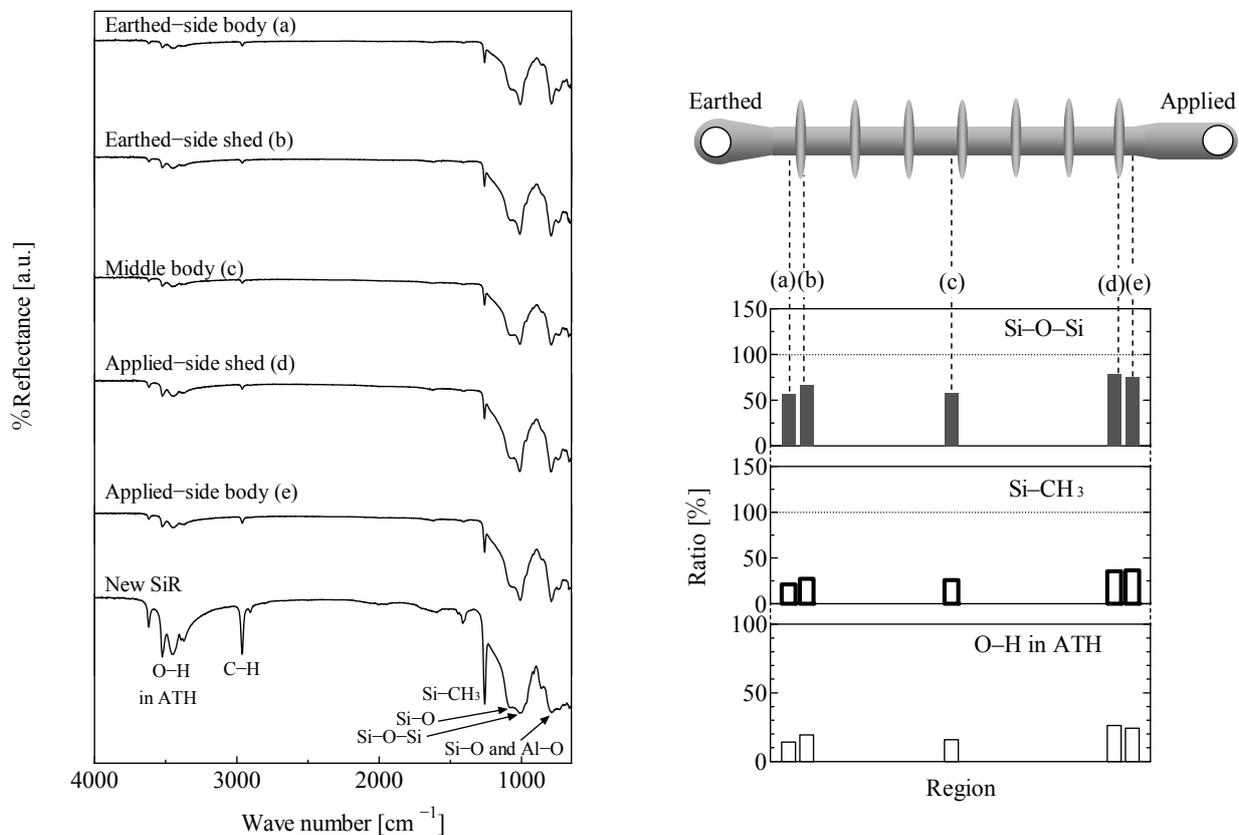


図 4.49 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の外被材料内部に対する強度 (右) (K-M-H-5)

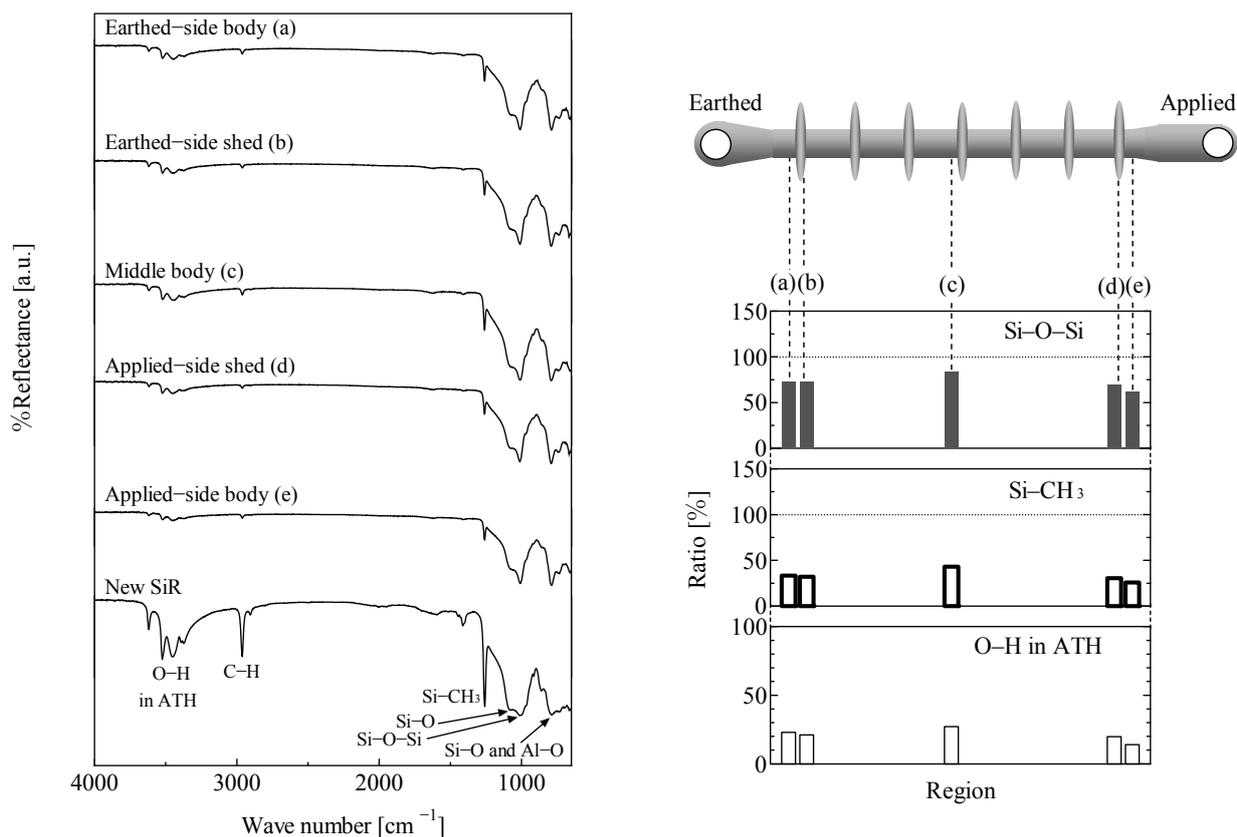


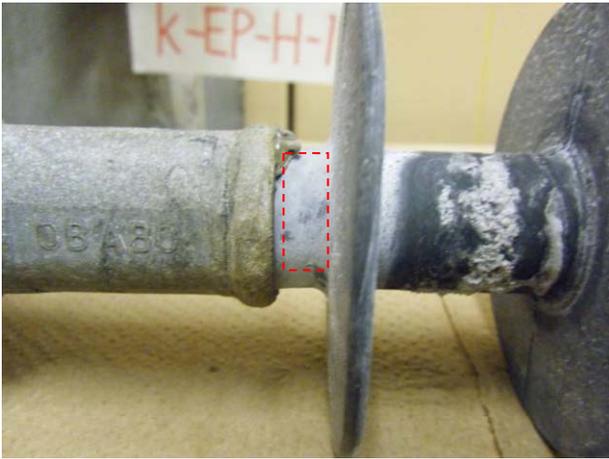
図 4.50 FT-IR スペクトル（左）及びピーク毎の外被材料内部に対する強度（右）(K-M-H-6)

4.3.2.5 EPDM 系引留め碍子

各碍子の外被材料を切り取り，FT-IR を用いて組成分析を行った。分析は図 4.51～図 4.53 に示すように，接地側胴部，接地側笠表面，中央胴部，課電側笠表面，課電側胴部に関して行い，それぞれ外被材料内部の分析結果と比較した。

図 4.54～図 4.56 に K-EP-H-1, K-EP-H-3, K-EP-H-4 で得られた FT-IR のスペクトル及びピーク毎の碍子笠内部に対する強度をそれぞれ示す。図 4.54～図 4.56 内の各記号 (a) ～ (f) はそれぞれ図 4.51～図 4.53 内の各記号と対応している。同図内で強度を示している C-H 基は図 4.57 の化学構造に示されているように，EPDM の側鎖の一部を担っている。また，O-H 基については化学構造内には含まれていないが，外被の充填剤として用いられている ATH 中に存在する官能基である。つまり，図 4.54～図 4.56 中に示す C-H 基の強度が大きいほど劣化の度合いが小さいことを示しており，O-H 基が大きいほど，放電等の外的ストレスによって外被材料内部の充填剤が表面に露出していることを示している。結果として，全ての試料において C-H 基の減少が確認された。ATH に起因する O-H 基については全体的に新品とほぼ同程度であるが，胴部において新品の 1.5 倍から 2 倍程度の強度が検出されている箇所もあった。この原因としては，塩霧試験で確認されたように，実環境においても碍子上での放電が比較的胴部に集中

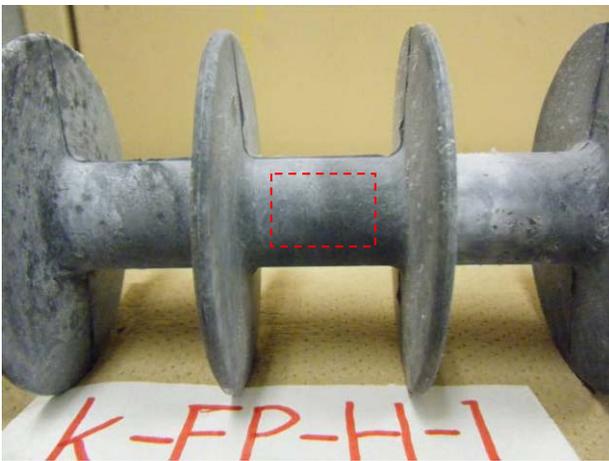
しやすかったためではないかと考えられる。以上のように、側鎖の切断、充填剤の露出と思われる変化はみられたが、主鎖の切断が進んでいると思われるようなピーク（C=C 基等）の増加は確認されなかった。このことから、EPDM 系引留め碍子ではまだ致命的な劣化は起こっていないものと考えられる。



(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部

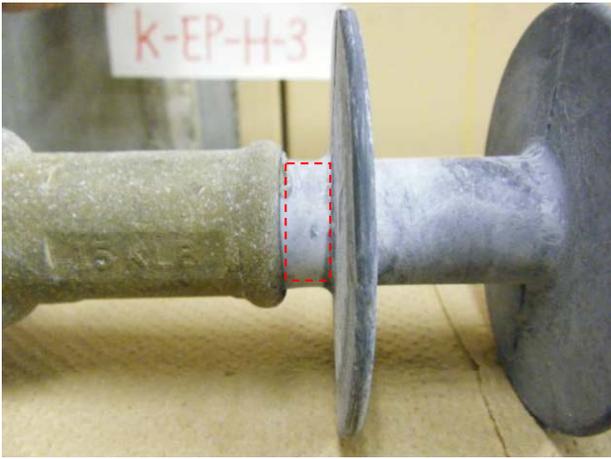


(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

図 4.51 分析箇所説明図 (K-EP-H-1)



(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

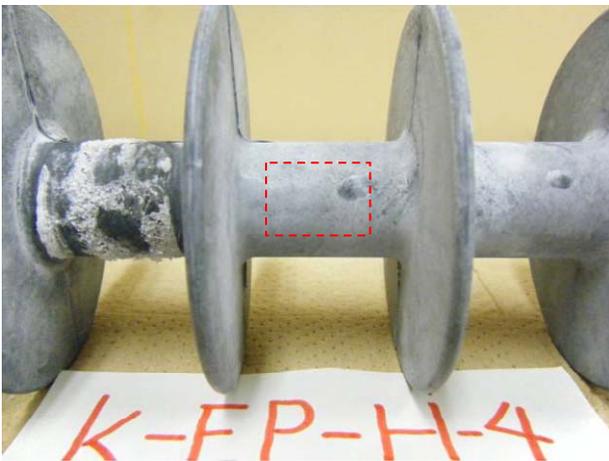
図 4.52 分析箇所説明図 (K-EP-H-3)



(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

図 4.53 分析箇所説明図 (K-EP-H-4)

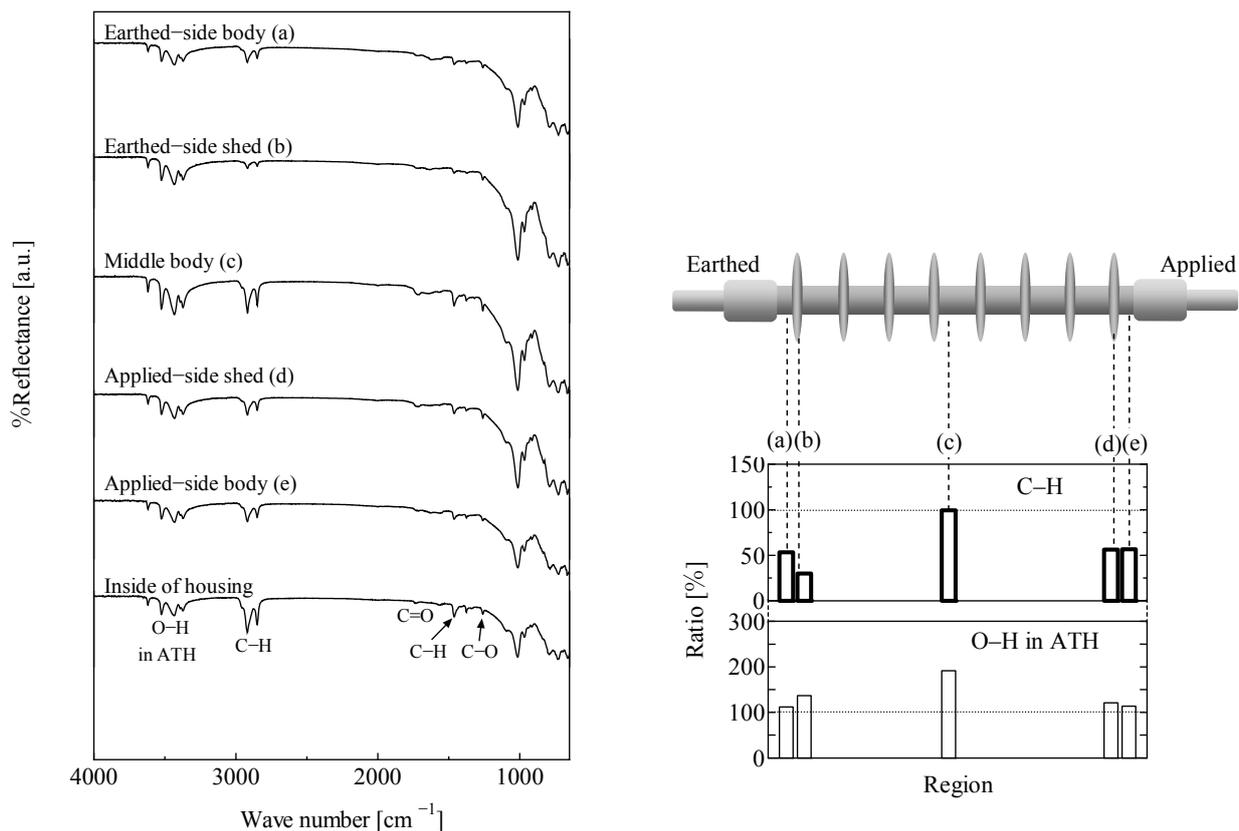


図 4.54 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の外被材料内部に対する強度 (右) (K-EP-H-1)

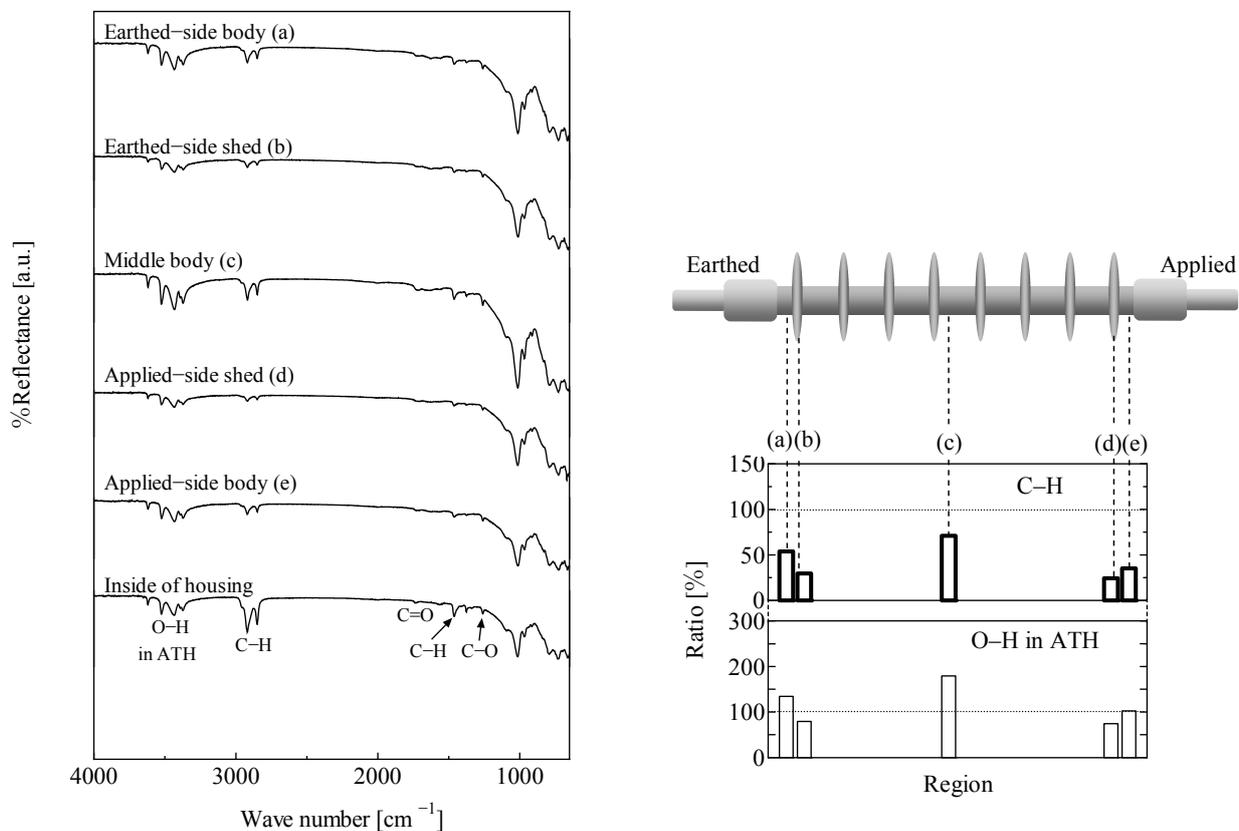


図 4.55 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の外被材料内部に対する強度 (右) (K-EP-H-3)

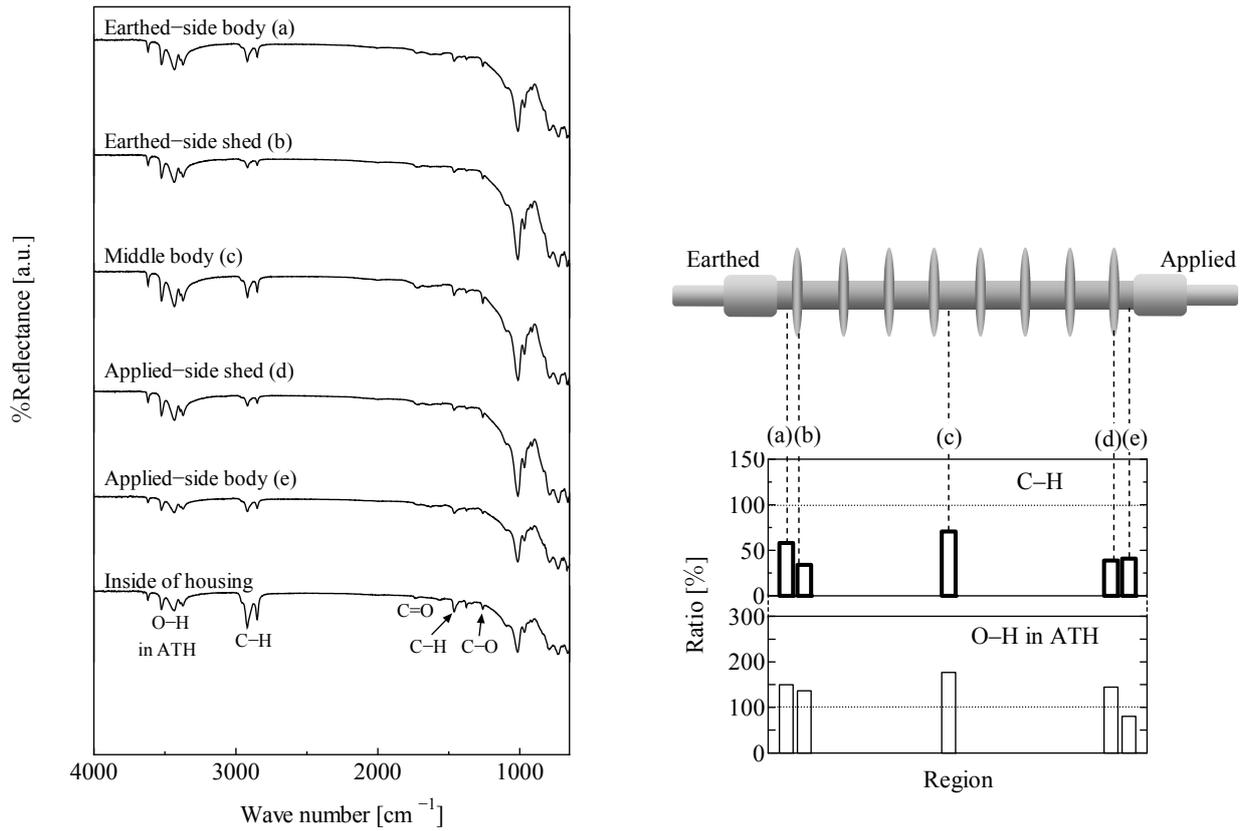


図 4.56 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の外被材料内部に対する強度 (右) (K-EP-H-4)

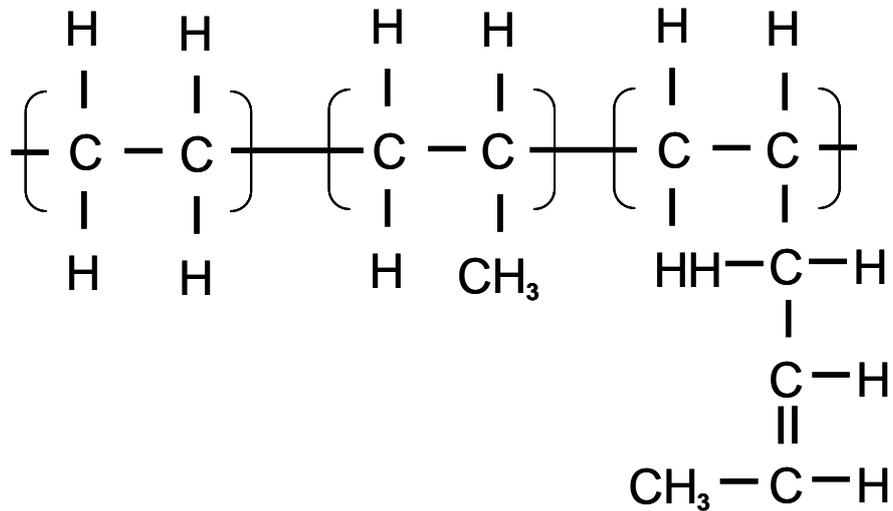
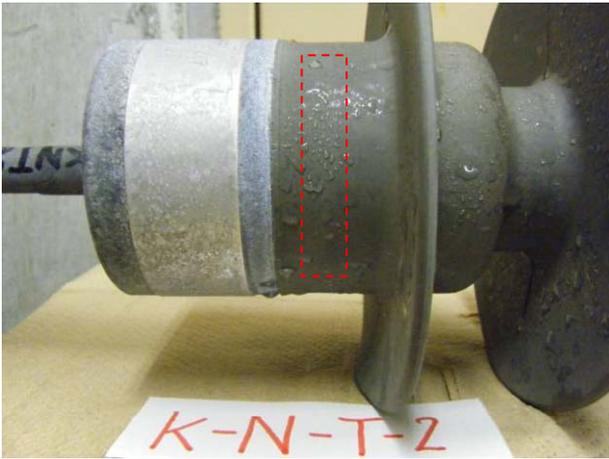


図 4.57 EPDM の化学構造

4.3.2.6 SiR系通り碍子

各碍子の外被材料を切り取り、FT-IRを用いて組成分析を行った。分析は図4.58及び図4.59に示すように、接地側胴部、接地側笠表面、中央胴部、課電側笠表面、課電側胴部に関して行い、それぞれSiR碍子新品の分析結果と比較した。

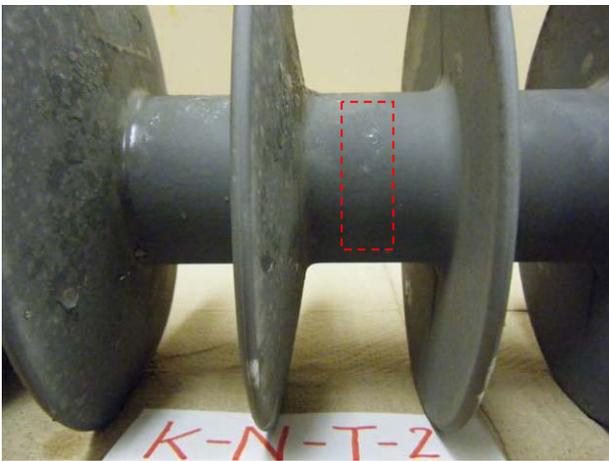
図4.60、図4.61にK-N-T-2及びK-N-T-4で得られたFT-IRのスペクトル及びピーク毎のSiR碍子新品に対する強度をそれぞれ示す。図4.60～図4.61内の各記号(a)～(f)はそれぞれ図4.58～図4.59内の各記号と対応している。これらの試料は4.3.2.2から4.3.2.5に示したものと同様にSiR系であり、同図内で強度を示しているSi-O-Si基、Si-CH₃基及びO-H基についても同様である。すなわち、Si-O-Si基及びSi-CH₃基の強度が大きいほど劣化の度合いが小さく、O-H基による強度が大きいほど、放電等の外的ストレスのよって外被材料内部の充填剤が表面に露出していることを示している。図4.60及び図4.61より、Si-O-Si基については、いずれの試料のどの箇所においても新品とほとんど変わらない強度が得られている。一方、Si-CH₃基については、新品の50～75%程度の低下が確認された。しかし、4.3.1項の塩霧試験の結果からは十分な耐汚損性能が確認されているため、Si-CH₃基の低下が50%未満である場合は碍子の耐汚損性能にほとんど影響しないと判断できる。また、K-N-T-2の笠部においては、苔の影響によりある程度の撥水性の不良がみられたが、分析の結果からSi-CH₃基の低下の度合いはK-N-T-4と同程度であることが分かった。



(a) 接地側胴部



(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部

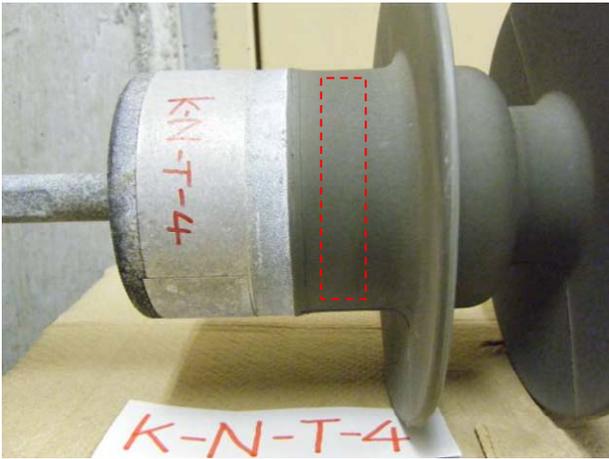


(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

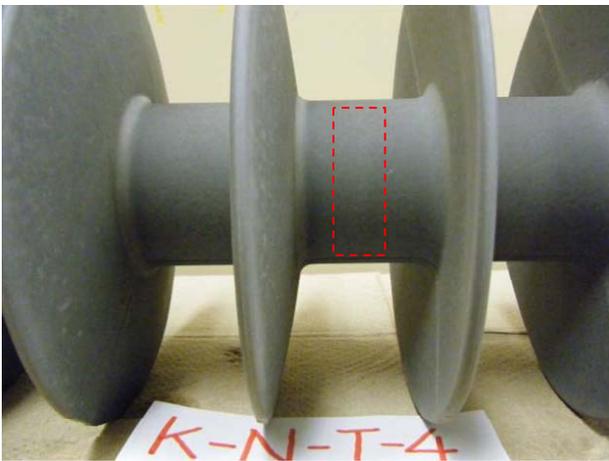
図 4.58 分析箇所説明図 (K-N-T-2)



(a) 接地側胴部



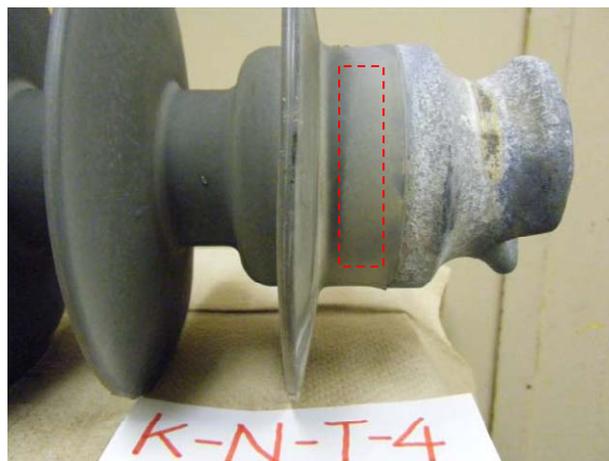
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

図 4.59 分析箇所説明図 (K-N-T-4)

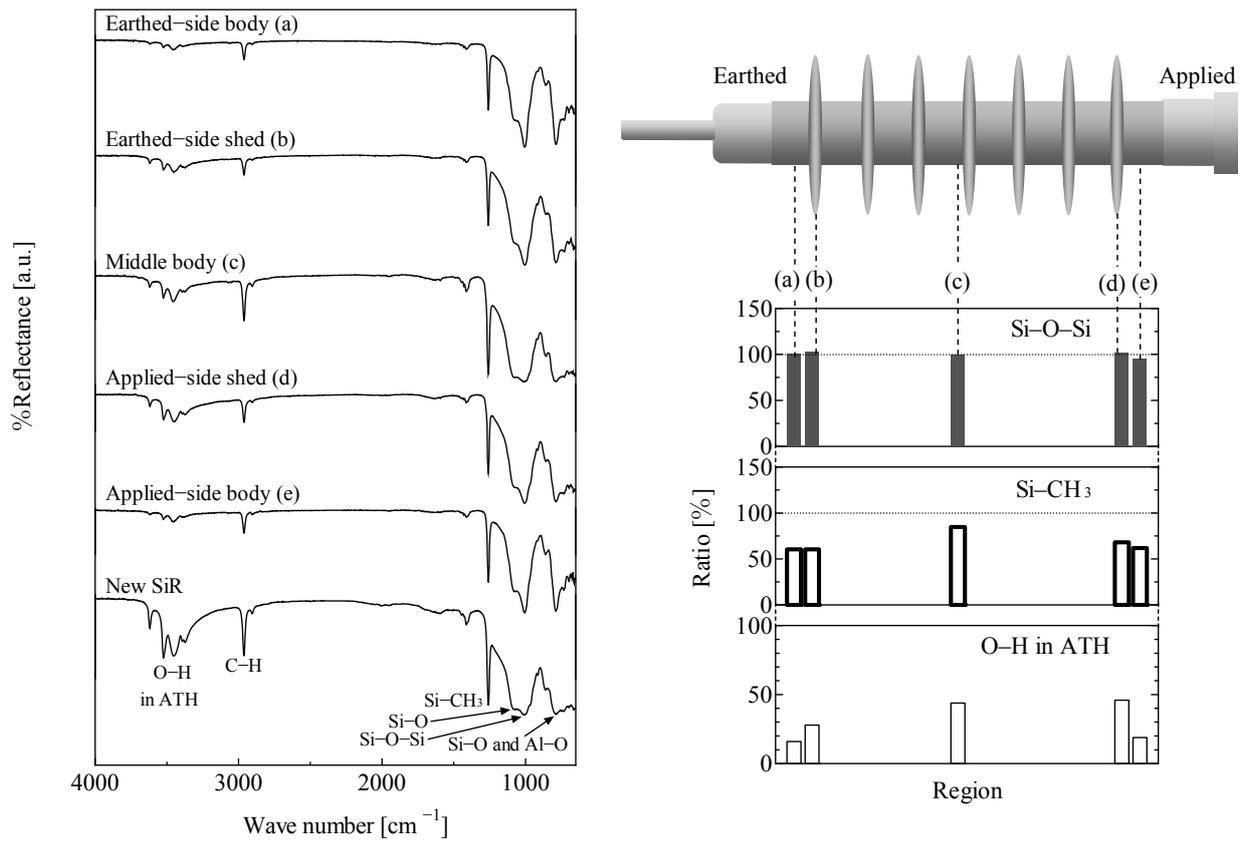


図 4.60 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の笠内部に対する強度 (右) (K-N-T-2)

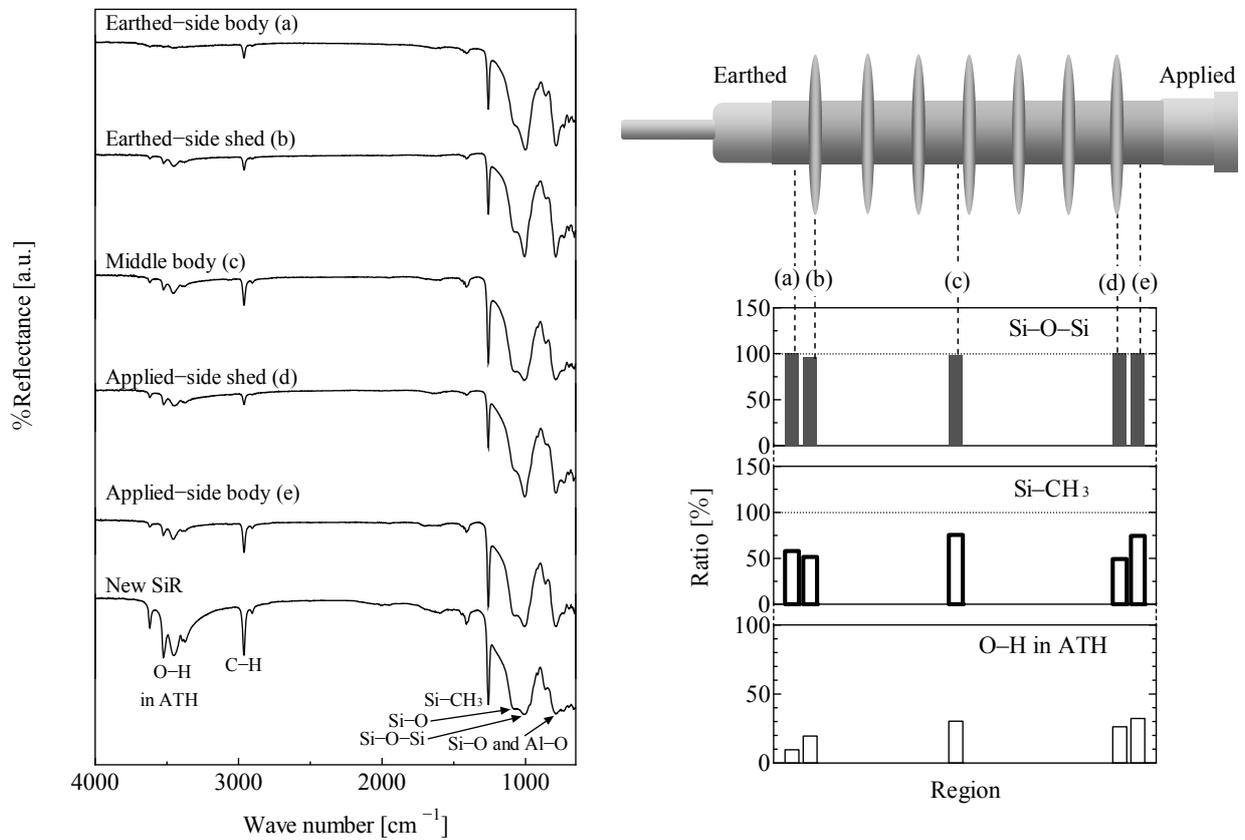
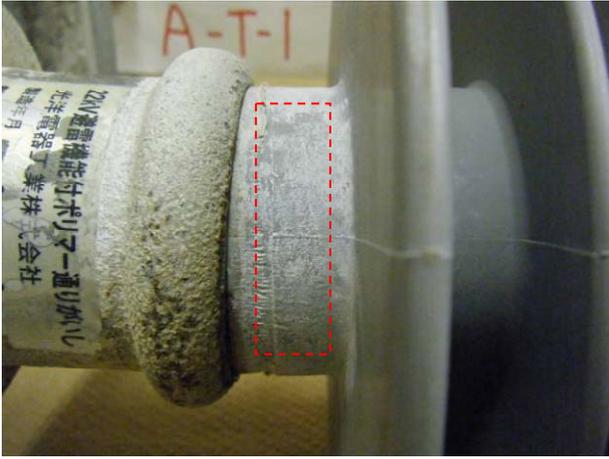


図 4.61 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の笠内部に対する強度 (右) (K-N-T-4)

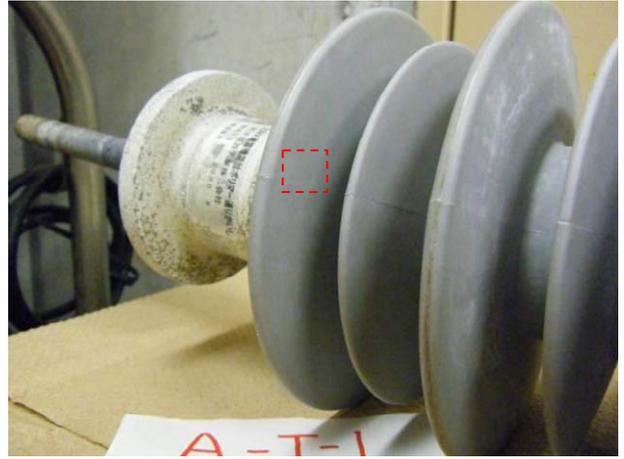
4.3.2.7 EVA系通り碍子

EVA系通り碍子の外被材料を切り取り、FT-IRを用いて組成分析した。分析は図4.62及び図4.63に示すように、接地側胴部、接地側笠表面、中央胴部、課電側笠表面、課電側胴部について行い、それぞれ新品EVA碍子の分析結果と比較した。

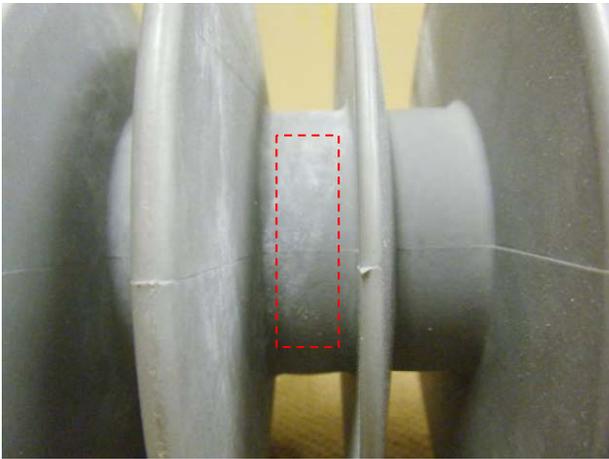
図4.64及び図4.65にA-T-1とA-T-3で得られたFT-IRのスペクトル及びピーク毎の新品EVA碍子に対する強度をそれぞれ示す。図4.64～図4.65内の各記号(a)～(f)はそれぞれ図4.62～図4.63内の各記号と対応している。これらの試料は4.3.2.1で示したものと同様にEVA系であり、同図内で強度を示しているC-H基、C-O基、C=C基及びO-H基についても同様である。すなわち、図4.64及び図4.65中に示すC=C基の強度が大きいほど劣化の度合いが大きく、逆に、C-H基及びC-O基の強度が大きいほど劣化の度合いが小さいことを示している。また、O-H基が大きいほど、放電等の外的ストレスによって外被材料内部の充填剤が表面に露出していることを示している。図から、最も劣化が進行しているのはC=C基が生成された割合が大きな課電側の胴部及び笠部と接地側胴部であると考えられる。特に課電側については、A-T-1、A-T-3ともに非常に大きなピークがみられた。この原因としては、課電側は使用中常にカバーに覆われていることから汚損物質が溜まりやすく、また課電状態にあることで放電による影響を受けやすかったためであると考えられる。ところで、側鎖の一部を担っているC-H基及びC-O基は全体的に減少している傾向がみられた。ATHに起因するO-H基については、A-T-1の接地側胴部及び笠部において新品の2倍から3倍程度の強度が検出されたが、それ以外の箇所については新品とほぼ同程度であった。これらの試料は、塩霧試験でもほとんどドライバンドアーク放電電氣量が検出されなかったことと併せて、ほとんど絶縁特性が劣化していないと言える。



(a) 接地側胴部



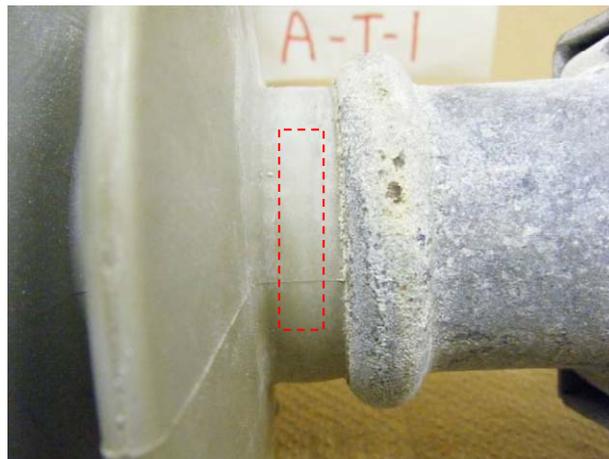
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部

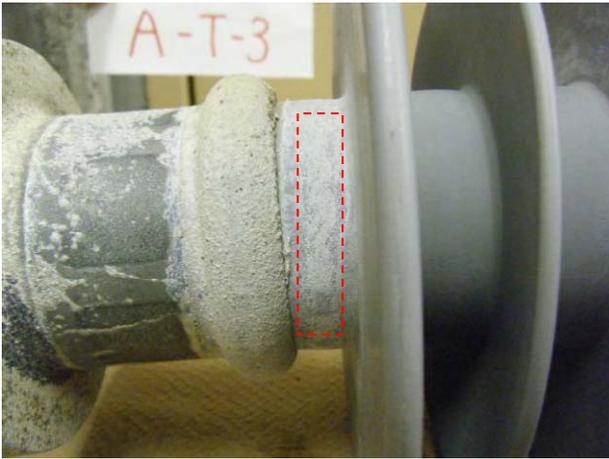


(d) 課電側笠表面

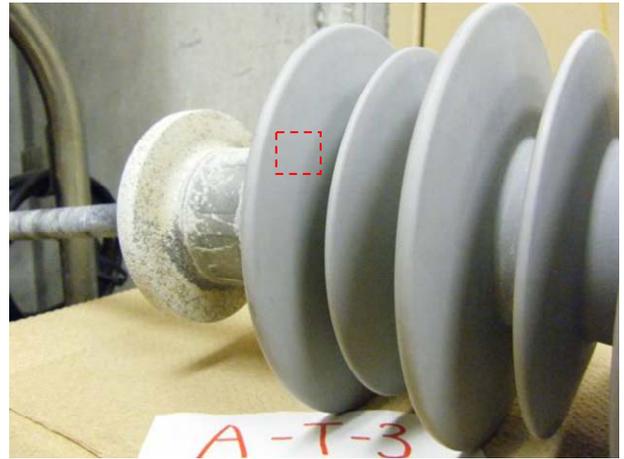


(e) 課電側胴部

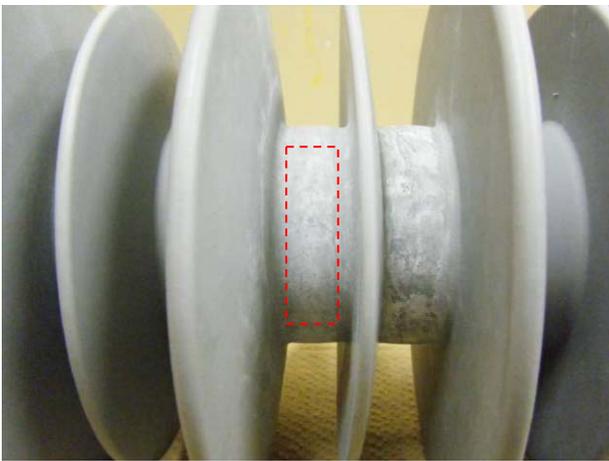
図 4.62 分析箇所説明図 (A-T-1)



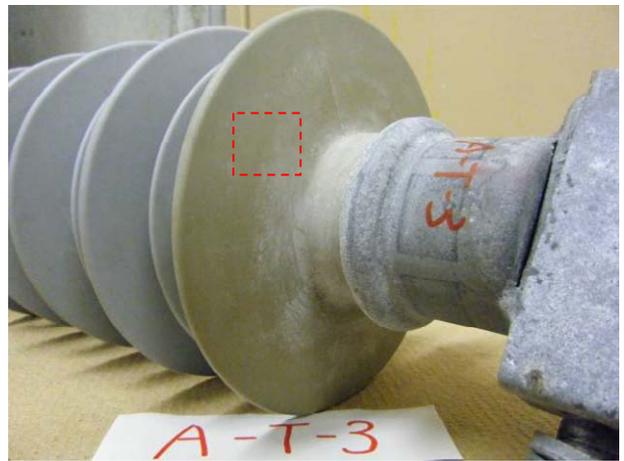
(a) 接地側胴部



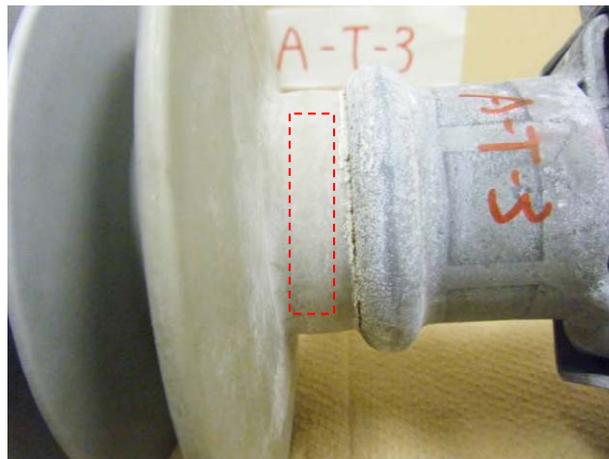
(b) 接地側笠表面



(c) 中央胴部



(d) 課電側笠表面



(e) 課電側胴部

図 4.63 分析箇所説明図 (A-T-3)

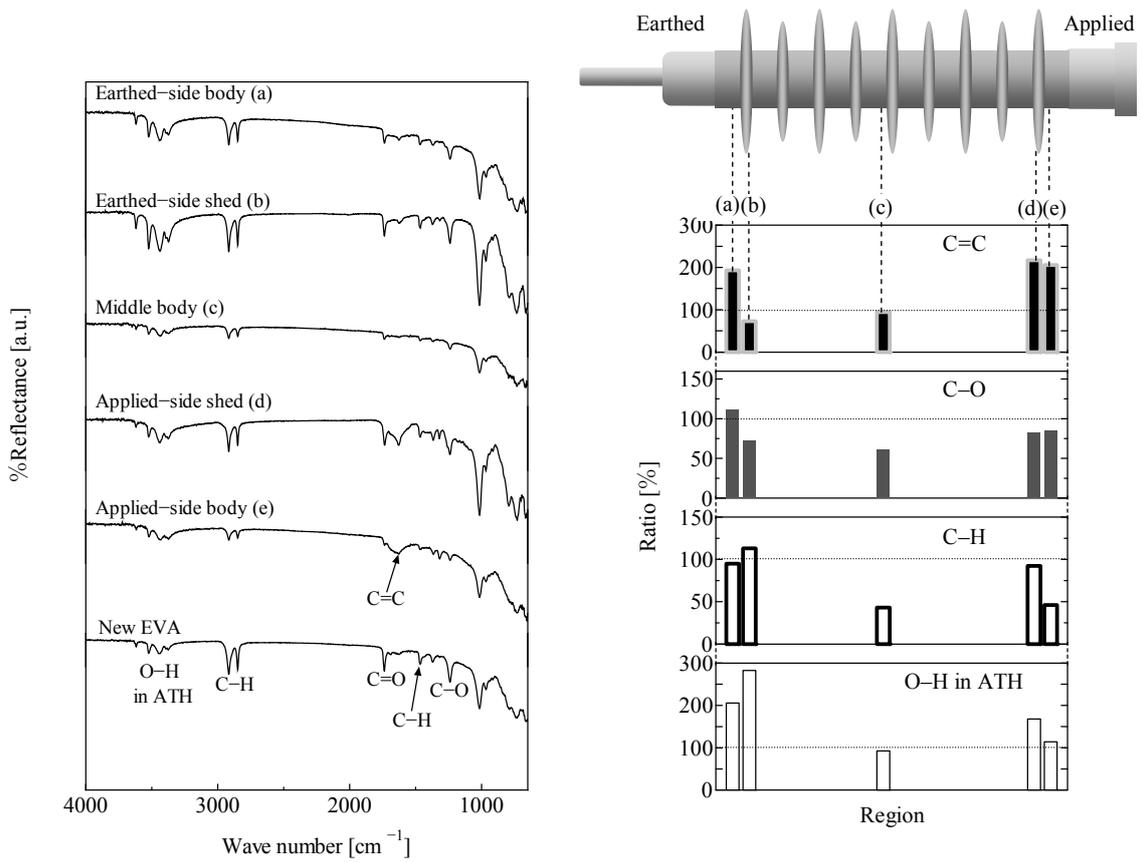


図 4.64 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の新品に対する強度 (右) (A-T-1)

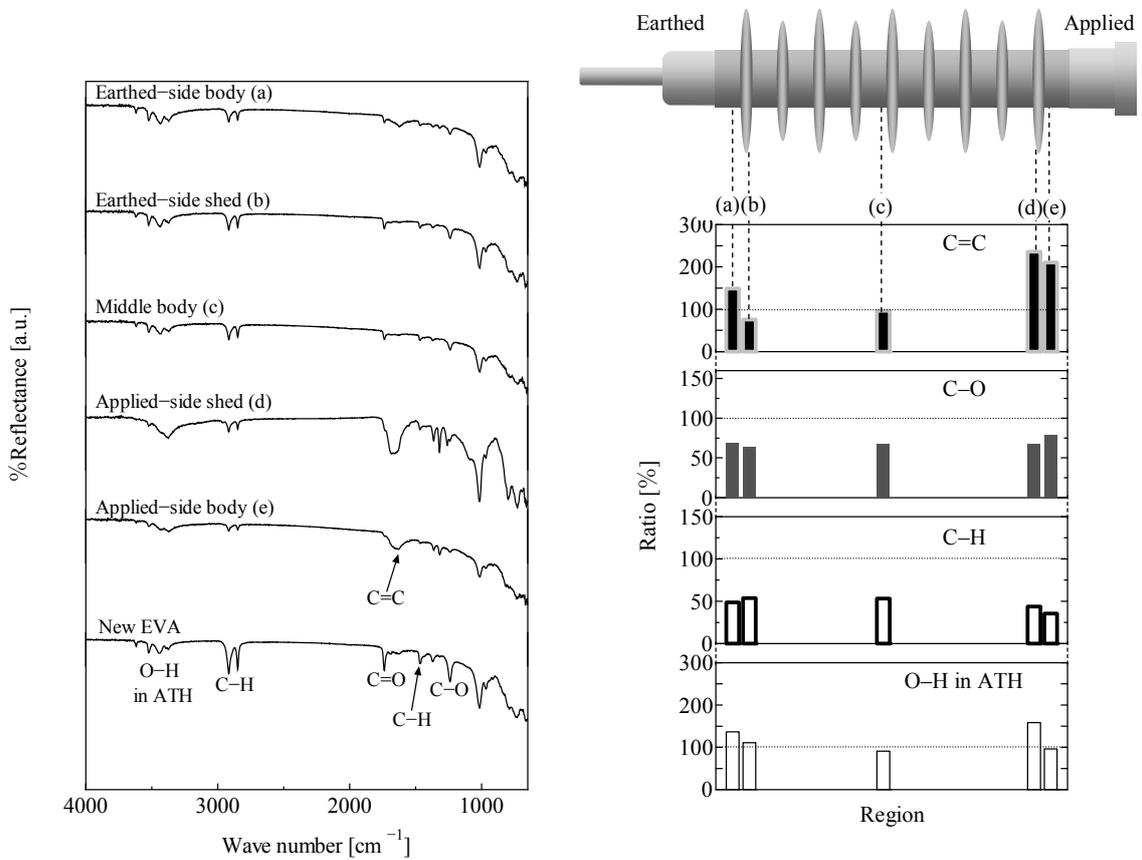


図 4.65 FT-IR スペクトル (左) 及びピーク毎の新品に対する強度 (右) (A-T-3)

4.3.3 STRI 法により評価した表面撥水性

塩霧試験を実施した後、FT-IR で分析を行った試料及び新品の試料に STRI 法を適用した。試料は撥水性の回復を考慮するため、FT-IR 後 24 時間以上回復させたものを用いた。また、試料毎にそれぞれ接地側胴部・笠部，中央胴部，課電側胴部・笠部の 5 箇所の測定を行った。各試料の撥水性クラスは，試料表面の水滴の形状をデジタルカメラにより撮影した画像から判断して評価を行った。

4.3.3.1 新品 SiR 罫子

図 4.66 に STRI 法による新品 SiR 罫子の撥水性評価結果を示す。同図から，初期段階における SiR 罫子の撥水性は良好であることが分かる。このように，新品 SiR 罫子は高い撥水性を有し優れた絶縁性能を持つが，その撥水性は低分子量成分（シリコンオイル等）に由来しているため，放電や酸，紫外線等に長期間曝されることによって，SiR の表面が劣化・改質することが懸念される。次より，10 年前後使用した SiR 罫子の経年による撥水性の変化について述べていく。

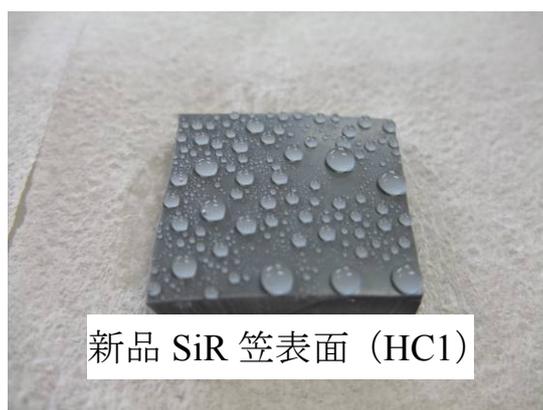


図 4.66 STRI 法による撥水性評価結果（新品 SiR）

4.3.3.2 SiR 系引留め罫子

図 4.67～図 4.70 に STRI 法による SiR 系引留め罫子の撥水性評価結果を示す。その結果，SiR 系引留め罫子の全てにおいて，撥水性は良好であることが確認された。また，それぞれの箇所についてみると，課電側胴部・笠部，中央胴部の撥水性が HC2 に低下しているが，これは長期間雨・紫外線等に曝され，表面の変質が起きたためであると考えられる。FT-IR の結果からも，SiR 系引留め罫子の撥水性に寄与するとされる側鎖（Si-CH₃ 基）の減少がみられており，妥当な結果と言える。

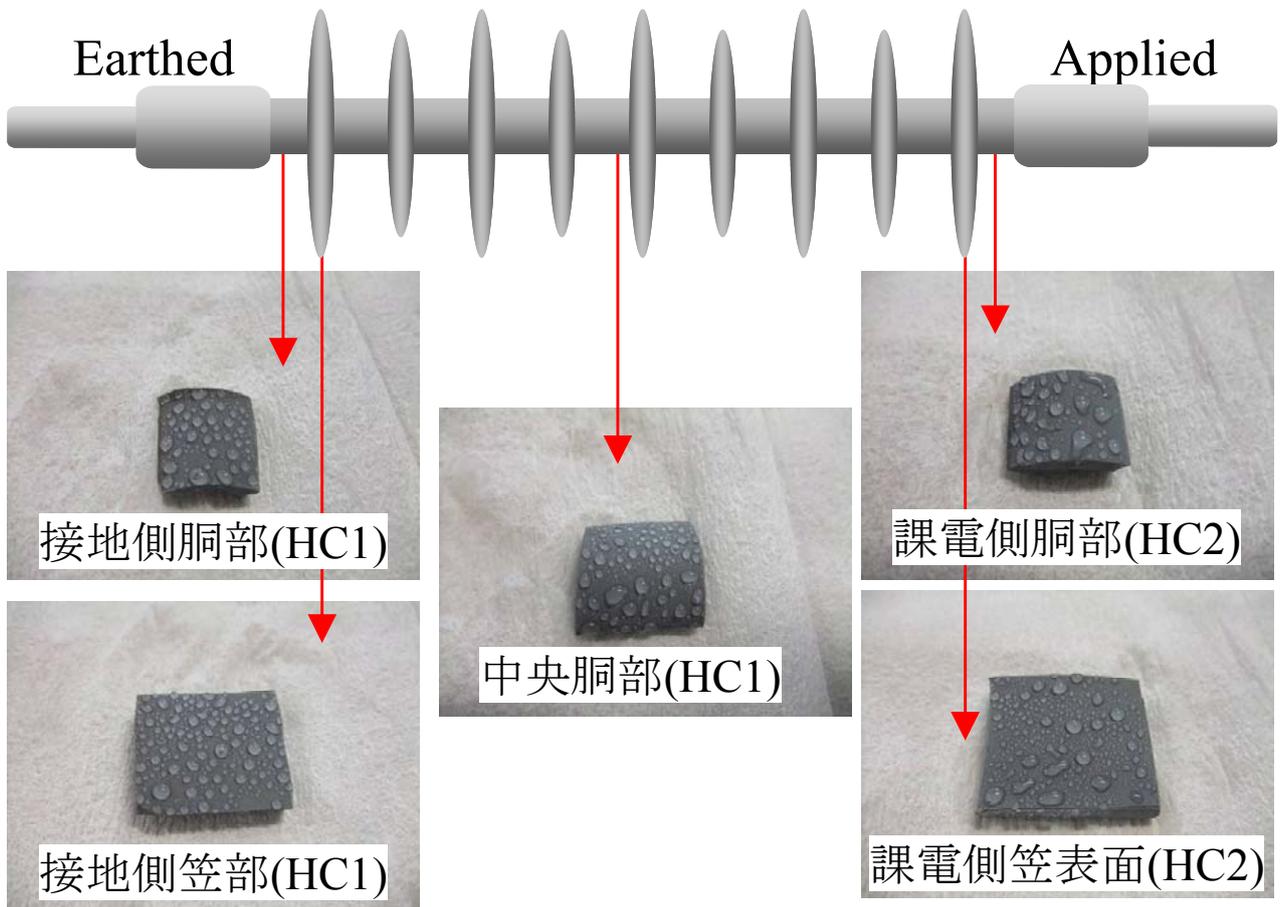


図 4.67 STRI 法による撥水性評価結果 (K-N-H-2)

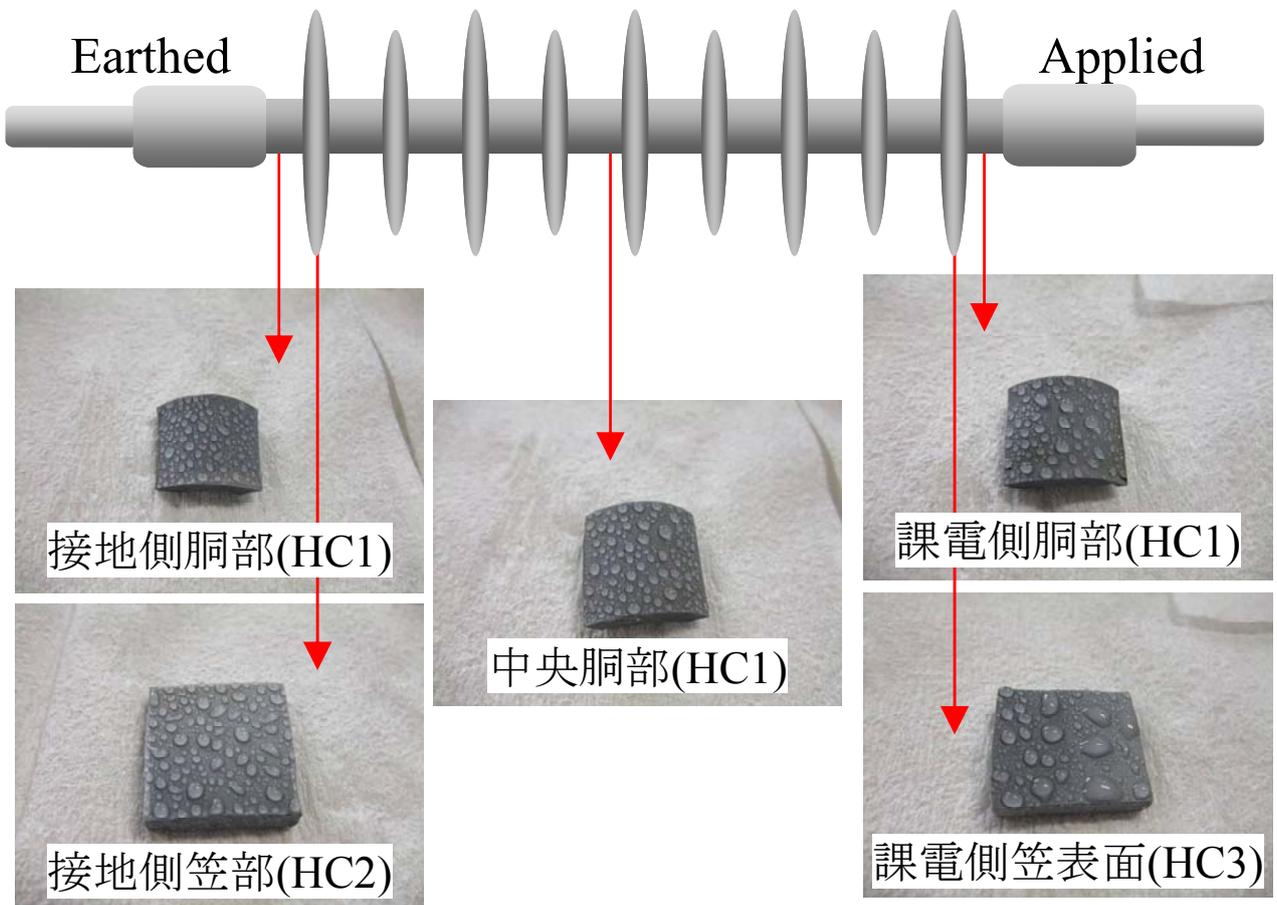


図 4.68 STRI 法による撥水性評価結果 (K-N-H-3)

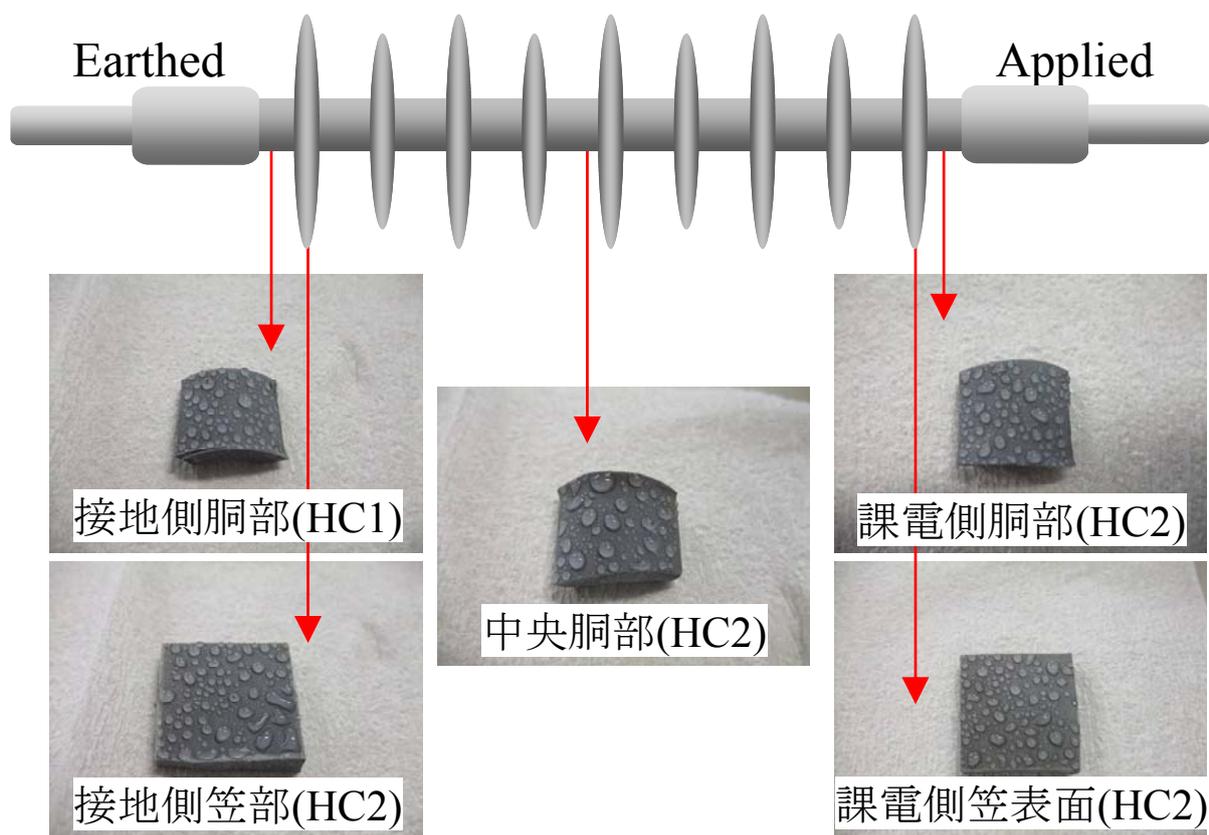


図 4.69 STRI 法による撥水性評価結果 (K-N-H-5)

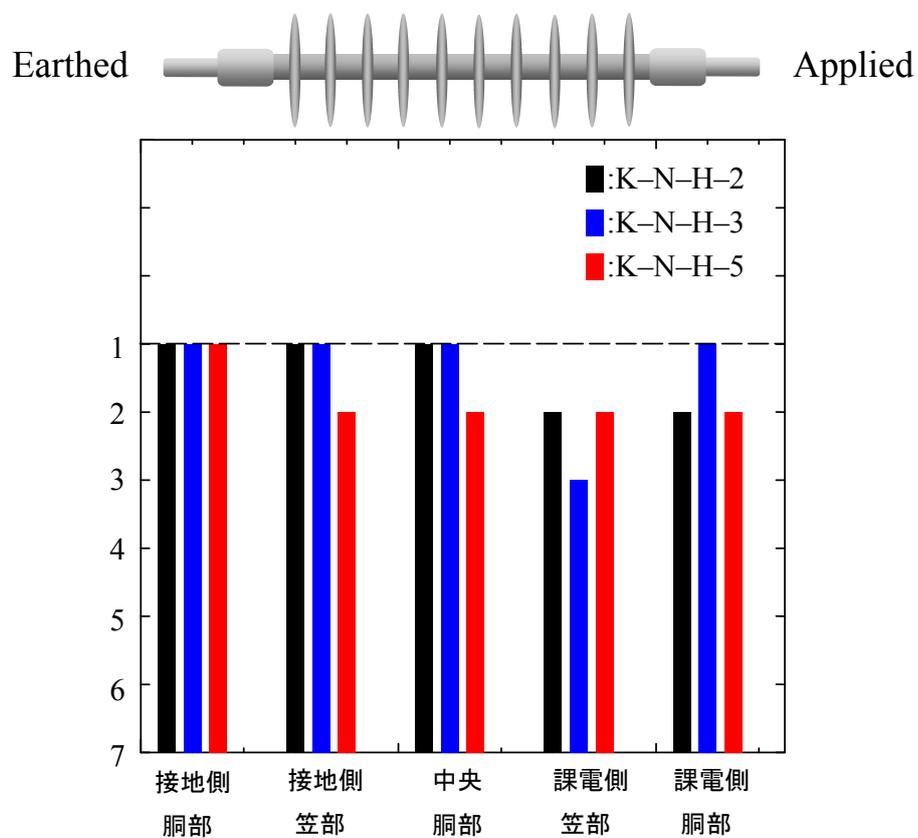


図 4.70 STRI 法による撥水性評価結果 (SiR 系引留め碍子)

4.3.3.3 SiR系引留め碍子A（レーストラック）

図 4.71～図 4.74 に STRI 法による SiR 系引留め碍子 A（レーストラック）の撥水性評価結果を示す。その結果、全ての SiR 系引留め碍子 A（レーストラック）において、撥水性が低下していることが確認された。それぞれの箇所についてみると、接地側・課電側の胴部や中央胴部は、多少の撥水性があるが、接地側・課電側の笠部は撥水性が極端に低下しており、試料の表面を水膜が全て覆う HC7 程度まで低下したことが確認された。通常、SiR 碍子は、低分子量成分の染み出しによる撥水性の回復が見込まれるが、SiR 系引留め碍子 A（レーストラック）の笠部については、撥水性の回復がみられないことから、表面の変質によって、本来の性質が消失したものと考えられる。この表面の変質については、4.3.2.3 において、主鎖である（Si-O-Si 結合）や撥水性に寄与するとされる側鎖（Si-CH₃ 基）の大幅な減少が確認されている。

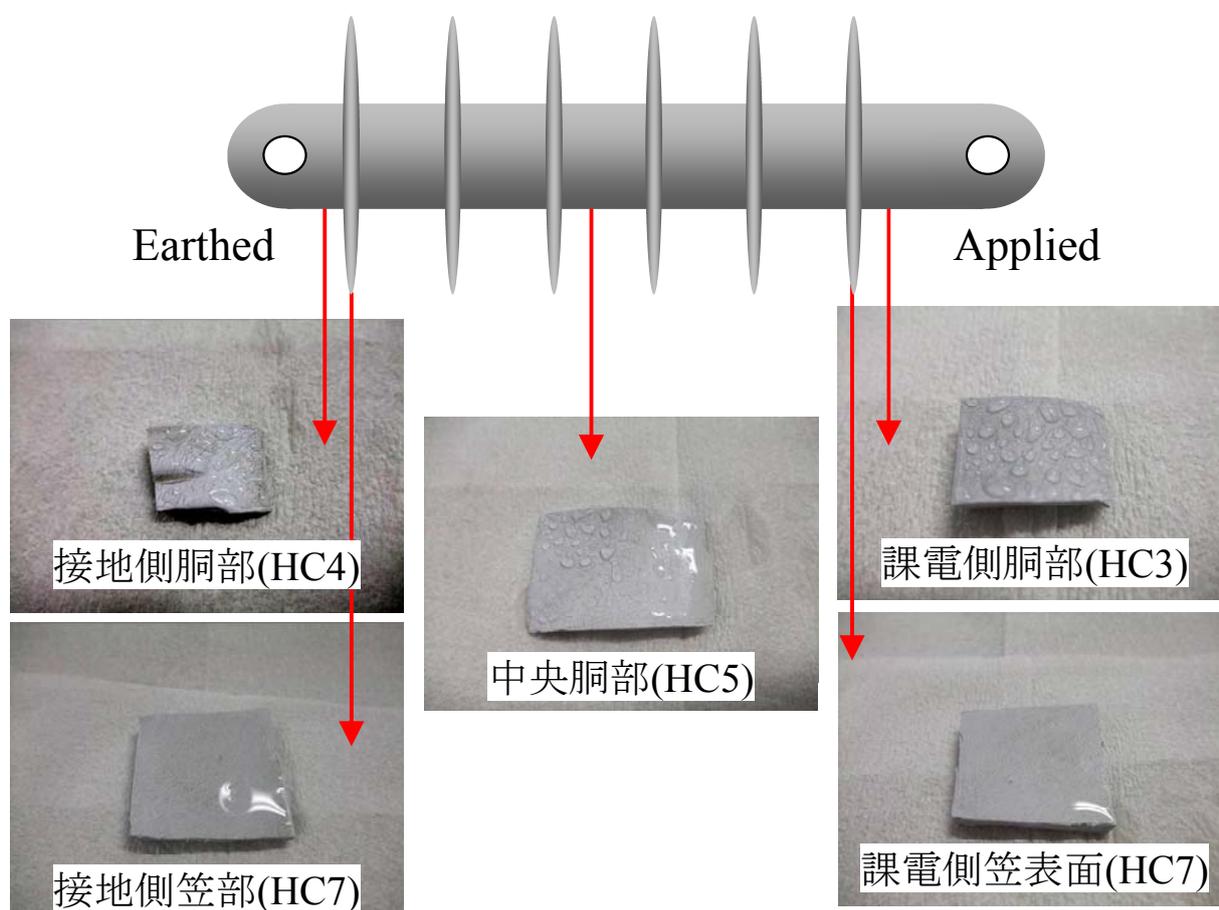


図 4.71 STRI 法による撥水性評価結果 (K-NR-H-1)

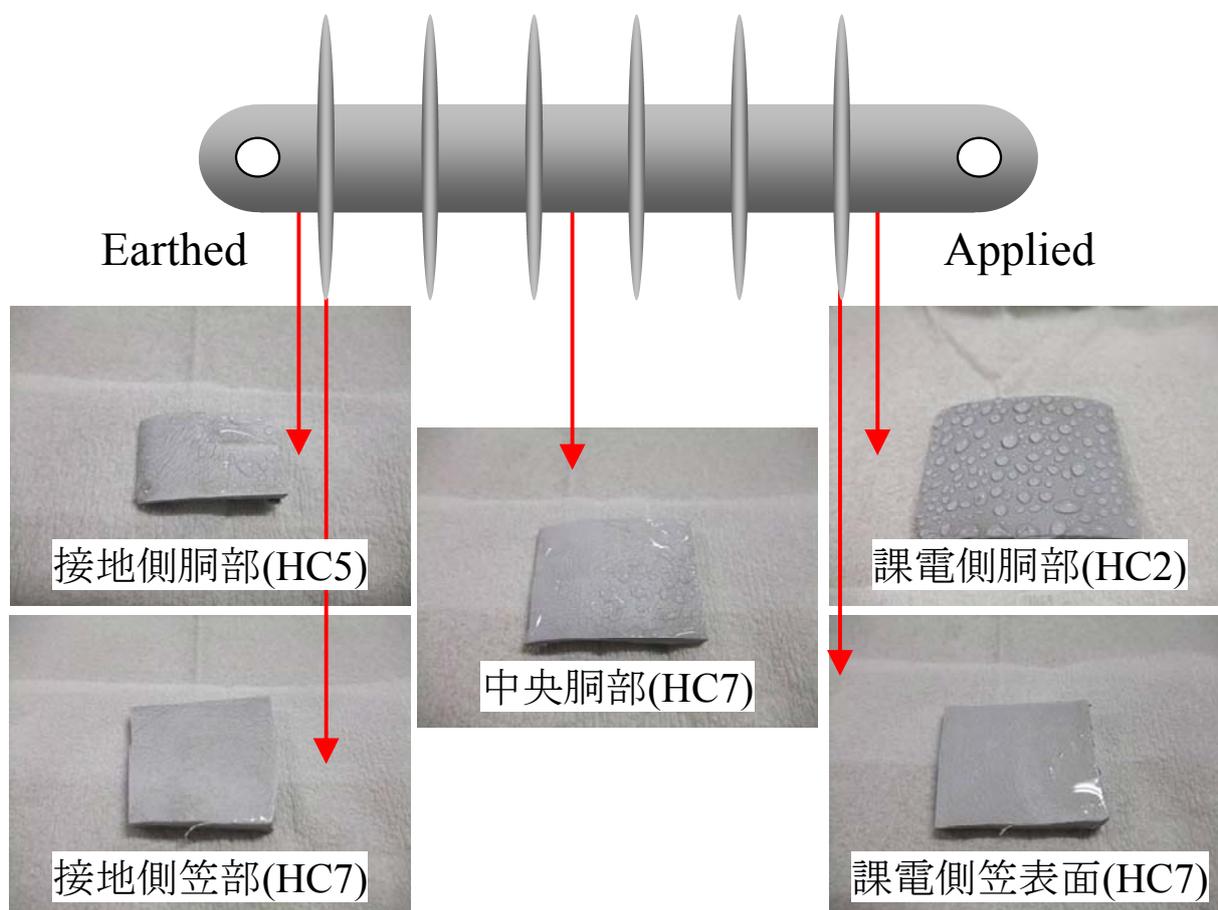


図 4.72 STRI 法による撥水性評価結果 (K-NR-H-2)

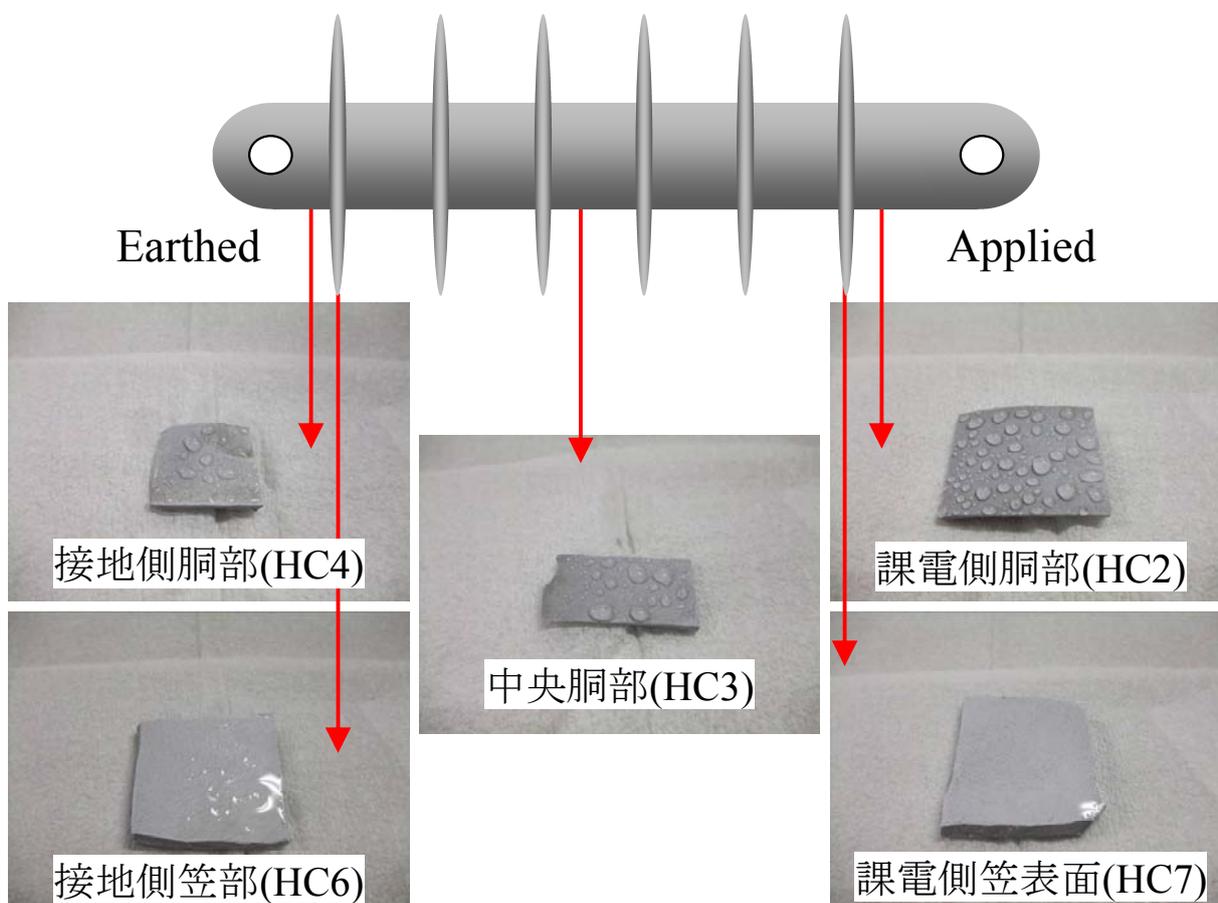


図 4.73 STRI 法による撥水性評価結果 (K-NR-H-3)

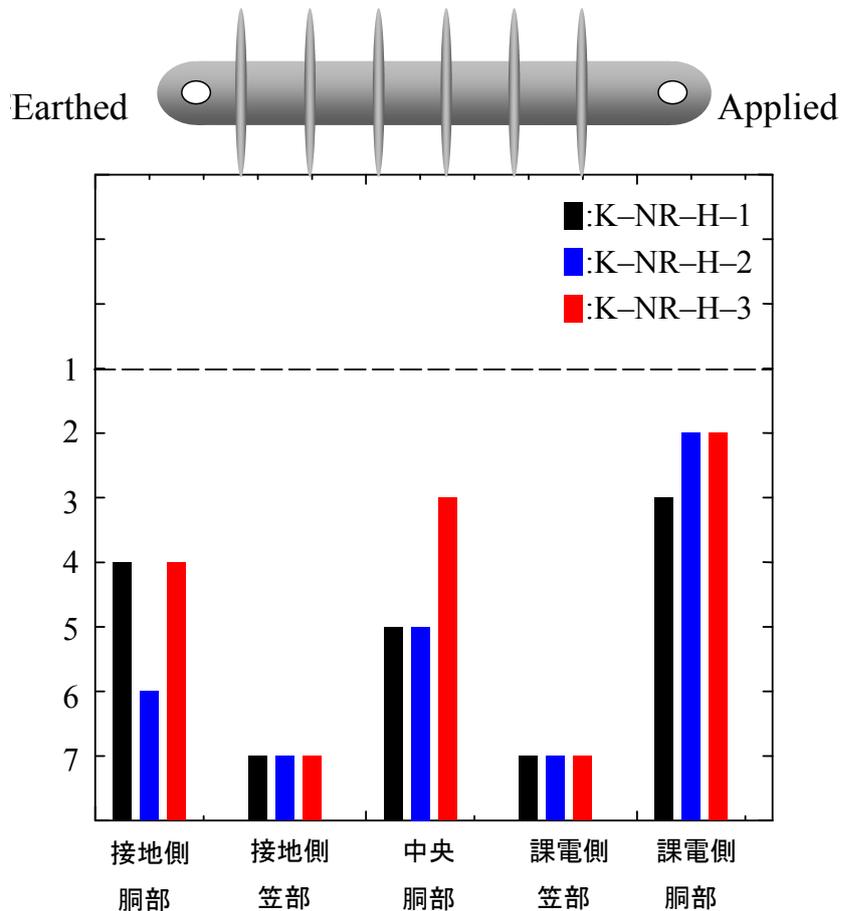


図 4.74 STRI 法による撥水性評価結果 (SiR 系引留め碍子 A (レーストラック))

4.3.3.4 SiR 系引留め碍子 B (レーストラック)

図 4.75～図 4.78 に STRI 法による SiR 系引留め碍子 B (レーストラック) の撥水性評価結果を示す。結果から、SiR 系引留め碍子 B (レーストラック) の全てにおいて、ある程度良好な撥水性であることが確認された。通常、図 4.75～4.77 で示したような HC1～HC3 程度の良好な撥水性を有していれば、漏れ電流波高値やアーク放電電気量は観測されないと考えられるが、SiR 系引留め碍子 B (レーストラック) では、4.3.1.4 で述べたように、漏れ電流波高値やアーク放電電気量が観測された。この原因としては、図 4.79 に示すように、10 年前後実環境で使用したことにより、碍子表面に厚い汚損層が形成され撥水性が低下していたことが挙げられる。汚損層の払拭前の撥水性は HC6 程度であったが、汚損層の払拭によって撥水性は飛躍的に回復し HC1 程度になった。塩霧試験後に FT-IR を実施するため試料の拭き取り作業を行った試料に STRI 法を適用したため、塩霧試験と STRI 法の結果で矛盾が生じたと考えられる。このことから、SiR 碍子の撥水性は、汚損層の厚さや付着物の種類等の影響を強く受けるということが示唆される。

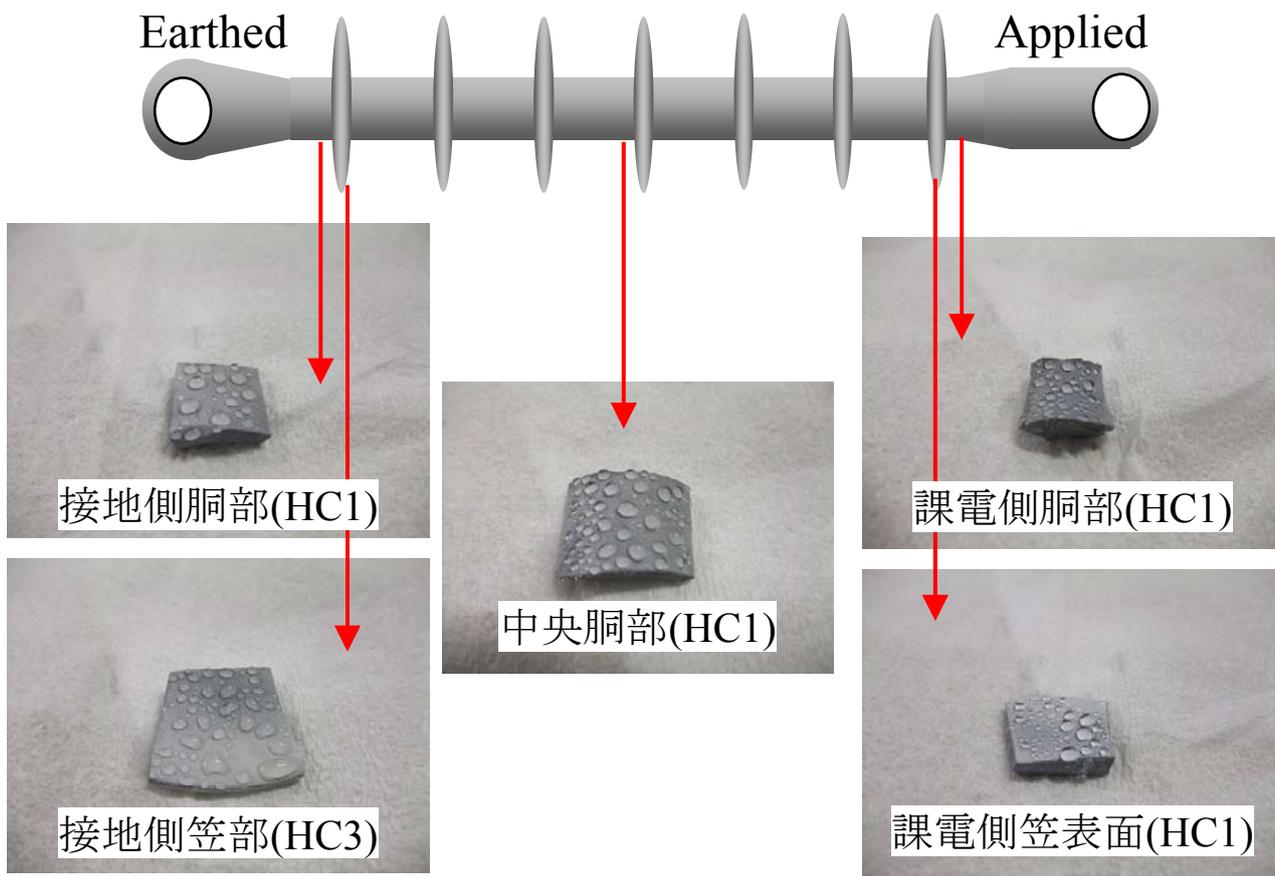


図 4.75 STRI 法による撥水性評価結果 (K-M-H-1)

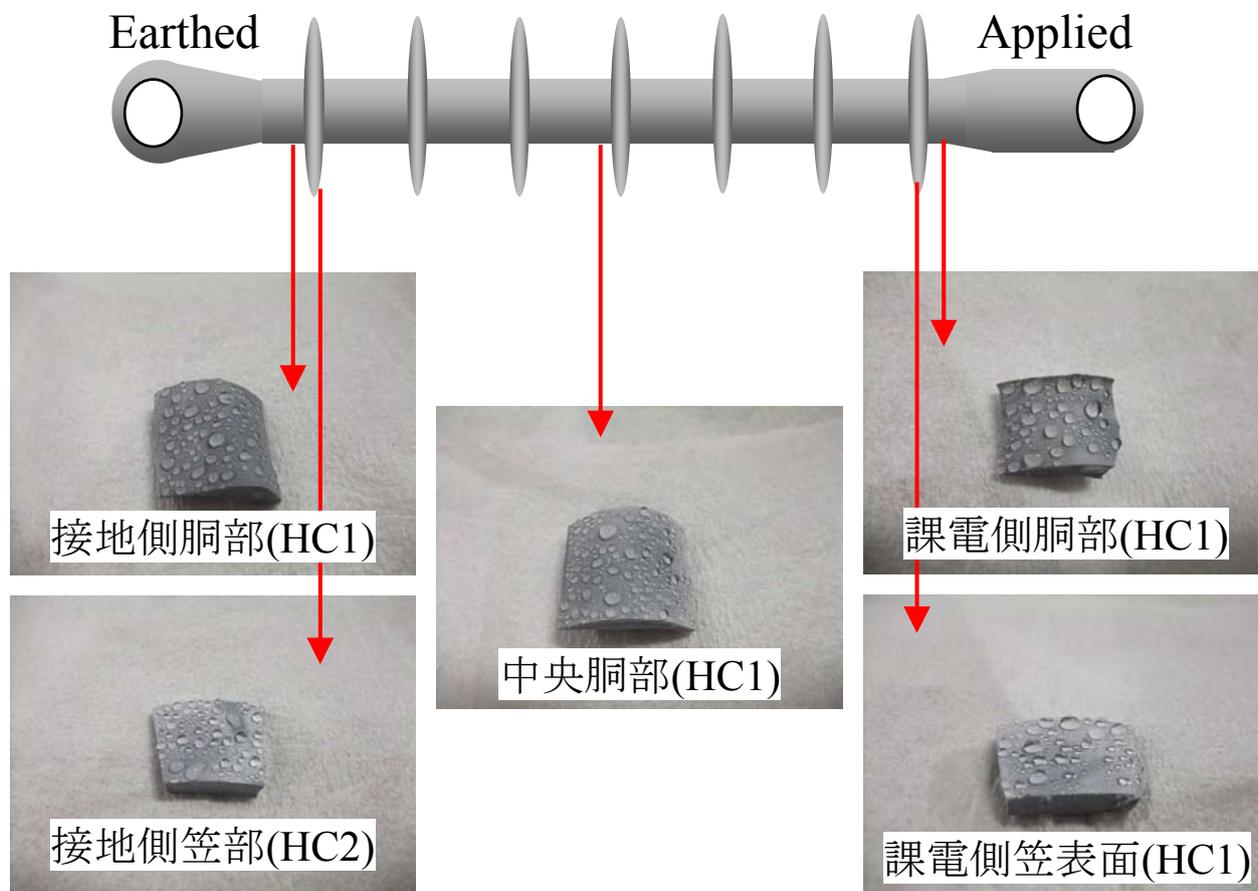


図 4.76 STRI 法による撥水性評価結果 (K-M-H-5)

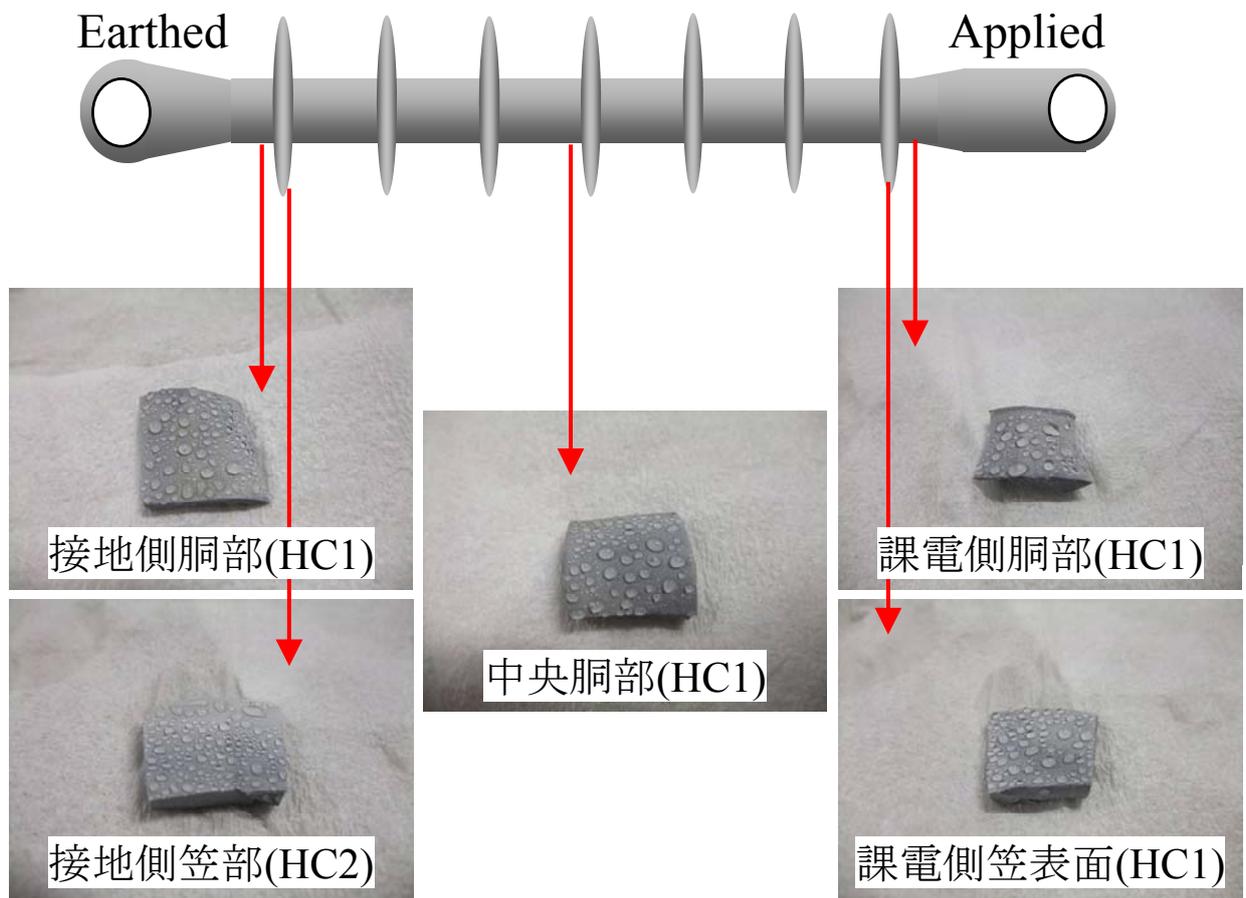


図 4.77 STRI 法による撥水性評価結果 (K-M-H-6)

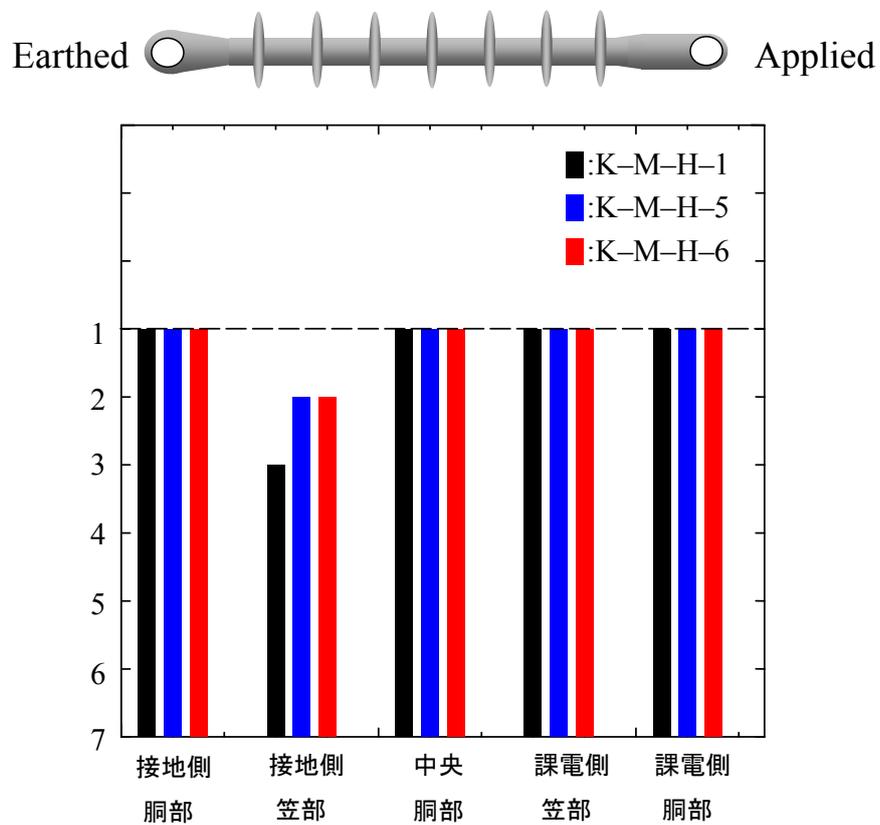


図 4.78 STRI 法による撥水性評価結果 (SiR 系引留め碍子 B (レーストラック))

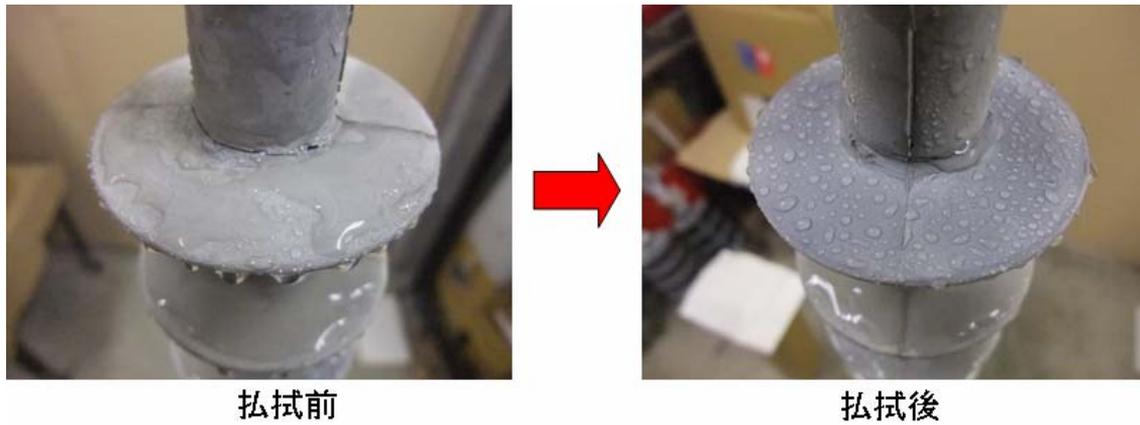


図 4.79 汚損層の拭き取りによる撥水性の変化 (K-M-H-5)

4.3.3.5 SiR 系通り罫子

図 4.80～図 4.82 に STRI 法による SiR 系通り罫子の撥水性評価結果を示す。その結果、SiR 系通り罫子の全ての箇所において、HC1 という良好な撥水性であることが確認された。

この罫子は、4.3.3.1 の SiR 系引留め罫子と同じメーカーの製造で、外被材料として用いられている SiR は同じ、若しくは同程度のものであると考えられる。SiR 系引留め罫子、SiR 系通り罫子共に 10 年前後使用した状況においても、良好な撥水性を有しており表面の劣化がほとんど見られない。

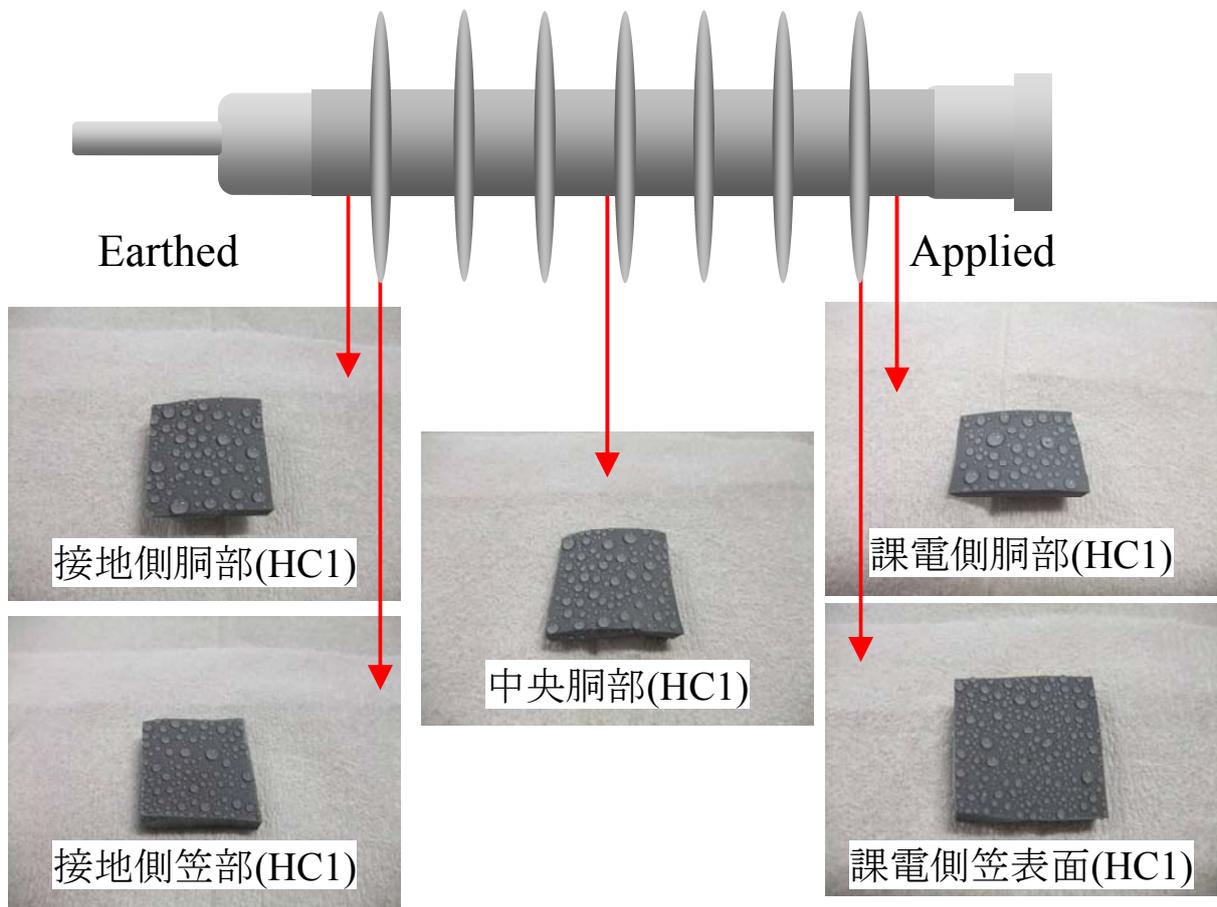


図 4.80 STRI 法による撥水性評価結果 (K-N-T-2)

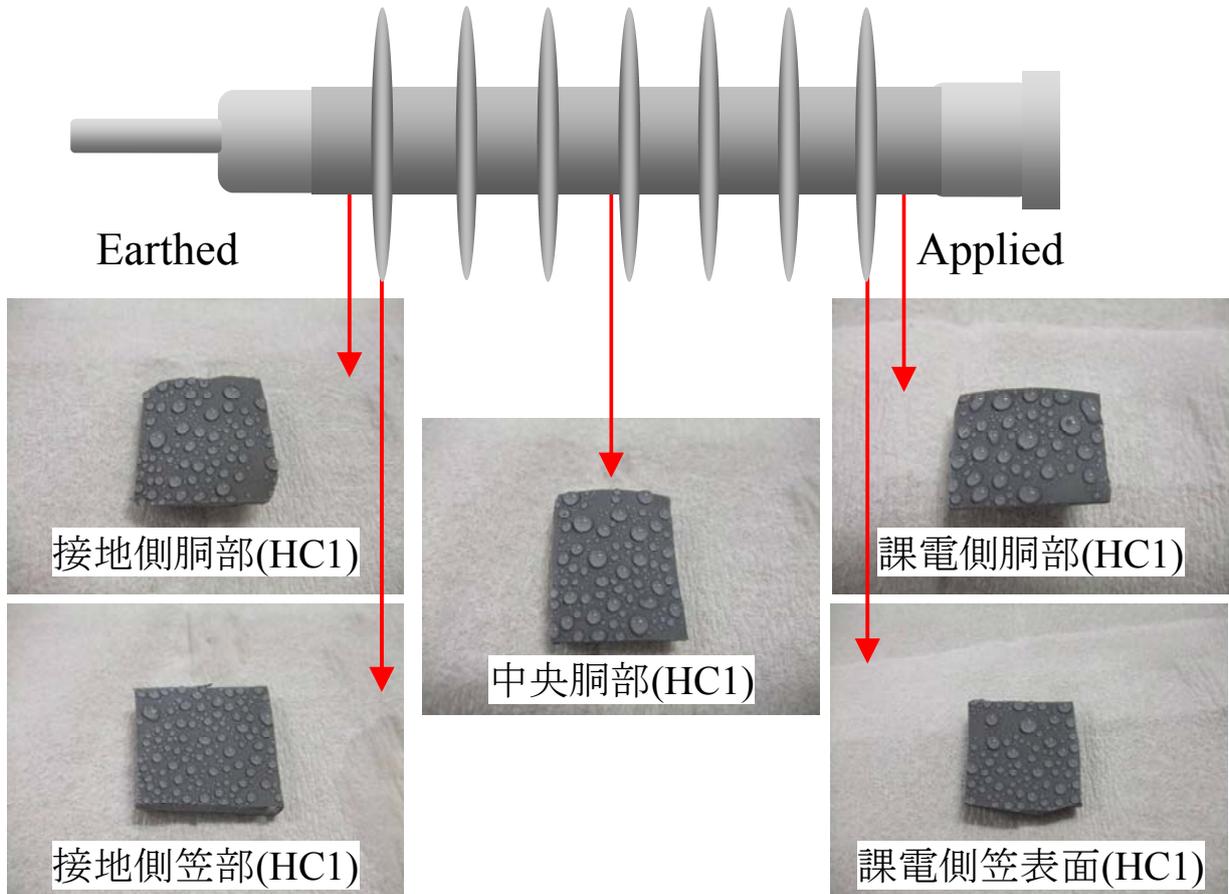


図 4.81 STRI 法による撥水性評価結果 (K-N-T-4)

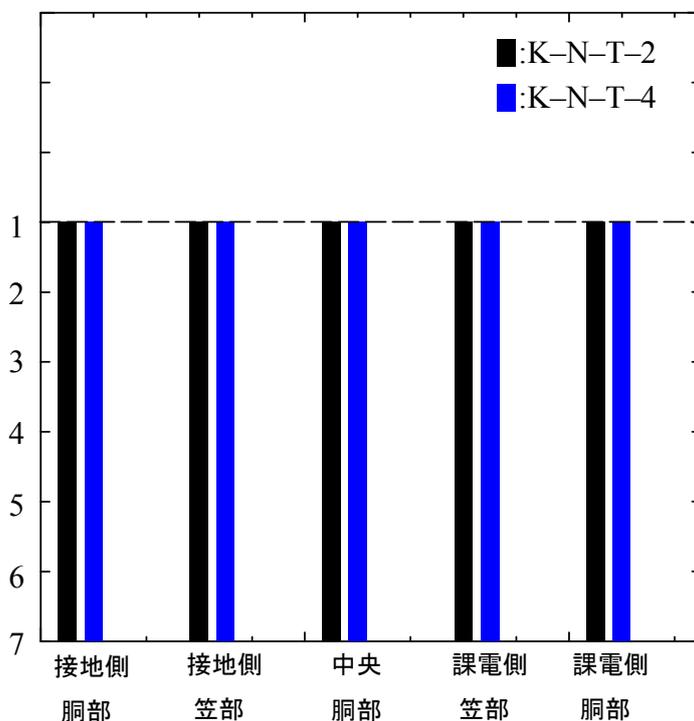
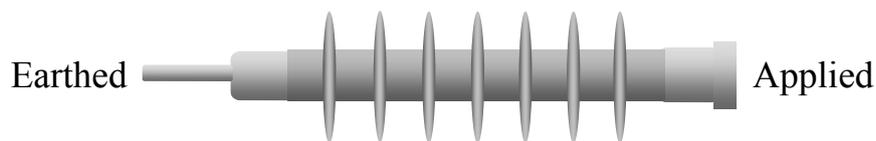


図 4.82 STRI 法による撥水性評価結果 (SiR 系通り碍子)

4.4 まとめ

外被材に EVA, SiR, EPDM を用いた碍子を用いて塩霧試験を行い、その後 FT-IR による外被材料表面の組成分析を行った。さらに、SiR 系の碍子では撥水性の評価を STRI 法により行った。その結果として、以下のような結果が得られた。

EVA 系引留め碍子に関しては、課電側笠部のトラッキング箇所における炭化や主鎖の切断が確認されたものの、塩霧試験によって新品の EVA 引留め碍子と同等もしくはそれ以上の耐汚損性能が確認された。そのため、10 年程度の実環境での使用によってその性能はほとんど変化していないことが確認された。

SiR 系引留め碍子に関しては、分析の結果、Si-CH₃ 基が新品の 70%前後の強度まで低下していたが、塩霧試験において高い絶縁性能及び撥水性を保っていたことから、10 年程度実環境で使用しても依然として十分な耐汚損性能を保持していることが示された。また、全ての碍子において、ある程度良好な撥水性が確認された。課電側胴部・笠部、中央胴部の撥水性が HC2 に低下していたが、これは長期間雨・紫外線等に曝され、表面の変質が起きたためことが原因として挙げられる。塩霧試験においてアーク放

電電気量が小さかったことから十分な撥水性を保持していると考えられる。

SiR 系引留め碍子（レーストラック）に関しては、形状の異なる 2 種類のメーカーのものがあったが、どちらの碍子においても、全体的な撥水性の低下（Si-CH₃ 基が新品の 50%以下まで減少）が確認された。また、塩霧試験において、撥水性を保持していない碍子（EVA 系及び EPDM 系）と同程度の漏れ電流が観測されたことから、SiR としての優れた耐汚損性能は失われていることが確認された。また、SiR 系引留め碍子 A（レーストラック）（: K-NR）の全ての碍子において、撥水性が低下していることが確認された。特に、接地側・課電側の笠部は撥水性が極端に低下しており、撥水性クラスは HC7 程度まで低下したことが確認された。また、K-NR の碍子は、他の SiR 碍子と比べ劣化が著しかった。SiR 系引留め碍子 B（レーストラック）（: K-M）の碍子では、STRI 法による評価は優れた撥水性（HC1 程度）であったが、これは表面の汚損層を払拭した後の評価である。また、汚損層の払拭前の撥水性が著しく悪い（HC6 程度）ことが確認された。このことから、SiR 系碍子の撥水性は、汚損層の厚さや付着物の種類等の影響を強く受けるということが示唆された。

EPDM 系引留め碍子に関しては、全体的に側鎖の一部（C-H 基）の切断が確認されたが、主鎖の切断が進んでいると思われるピーク（C=C 基）の増加等は確認されなかった。また、塩霧試験において試料によって漏れ電流に大きな差異は見られなかった。また、アーク放電電気量の最終値は EVA 新品碍子よりも小さかった。

EVA 系通り碍子に関しては、EVA 系引留め碍子と同じく、主に課電側カバー内部における主鎖の切断が確認された。試料の数が十分に得られなかったため塩霧試験が実施できず、外被材料の劣化と絶縁性能との関係は評価できなかった。

SiR 系通り碍子に関しては、Si-CH₃ 基が新品の 50~75%程度まで低下していたものの、塩霧試験においてほとんど漏れ電流は流れず、苔つき碍子（K-N-T-2）についても十分な耐汚損性能を保持していた。また、全ての碍子において、HC1 という良好な撥水性であることが確認された。K-N は通り碍子、引留め碍子共に 10 年前後使用した状況においても、塩霧試験で良好な耐汚損特性を示している。さらに、FT-IR や STRI 法においても、表面の劣化がほとんど見られないことや良好な撥水性を有することから、今回評価を行った SiR 系の試料の中で最も材料の長期信頼性が高いと言える。

第5章 交・直流課電時におけるポリマー材料の電気的特性の比較

5.1 はじめに

ポリマー材料は多くの利点を有しているが、なかでもシリコンゴムは、耐候性に優れ、撥水性を有するために、非常に優れた耐汚損特性を発揮する。また、撥水性が一時的に低下しても回復する特性を持っている。しかし、国内での使用実績はまだ浅く、ポリマー罫管が主に用いられている北米等と比べ、日本の気候はポリマー罫管にとって非常に苛酷であると言える。そのため、ポリマー罫管を日本で用いる上で、その劣化機構の解明と長期信頼性の把握が最重要課題となっている⁽²⁾。この長期的なポリマー材料の劣化評価は、実フィールドでの長期間曝露（屋外曝露試験）をすることが最適であると思われるが、結果を得るまでに多くの時間と労力を費やす。そのため、劣化に寄与する環境ストレスを凝縮・加速すること（人工加速劣化試験）により、短期間のうちに寿命を評価し、曝露試験の結果と照らし合わせることによる長期信頼性の把握が求められている⁽¹⁵⁾。

ところで、直流用ポリマー避雷器の外被材料にシリコンゴムを適用するにあたっては、長期直流課電下でのシリコンゴムの絶縁性能の保持を確認することが必要である。しかし、国内外において直流と交流による絶縁特性への影響の違いを比較したデータはほとんど存在しない。そこで、本研究では、SiR 試料と LSR 試料を用いた加速塩霧試験を行うことによって、直流放電と交流放電の挙動を比較するとともに、実使用環境を考慮した試験として、汚損物質の違いによる漏れ電流の違いについて検討した。

5.2 塩霧試験

5.2.1 塩霧試験方法

電源用変圧器には単相変圧器（九州変圧器株式会社（現：株式会社キューヘン）、定格容量 10 kVA）を用いた。直流課電試験時にはシリコン高電圧整流ダイオード（オリジン電気株式会社、平均整流電流 100 mA）を用いて半波整流を行い、さらに、平滑コンデンサ（ニチコン株式会社、静電容量 50 μ F）を用いて平滑化を行った。図 5.1 に整流後の電流波形を示す。同図のように、整流後の電流波形におけるリップル率は 0.5%であった。表 5.1 に試験条件を示す。また、図 5.2 及び図 5.3 に、直流正極性課電時における試験回路の概要と試料配置図をそれぞれ示す。表 5.2 に示すように、試料には SiR 試料 2 種類（疎水化処理済み ATH 充填率 33wt%シリコンゴム、疎水化処理済み ATH 充填率 60wt%シリコンゴム）と、LSR 試料 4 種類（以下、A, B, C, D と記す。）の全 6 種類を用いた。ここで、A と B、及び C と D は基本的に同じものであるが、試料成型時の離型剤使用の有無が異なる。A, B と C, D では、A, B が C, D に比べて難燃性である。また、SiR 試料と LSR 試料では試料の厚さが異なり、前者は 2 mm

後者は 5 mm である。試料は実際の絶縁機器の外被角度を模擬し、電極方向に対して水平に 6 度傾けて設置した。試験電圧は、電極間距離 50 mm に ± 3 kV(rms) を印加し、試料表面の平均電界強度が 60 V/mm になるように設定した。試験中は常時課電するとともに、導電率 4 mS/cm の塩霧を噴霧量 0.6 l/h で常時噴霧した。試験時間は 24 時間とし、試験中の漏れ電流波高値及び電気量を記録するとともに、試験前後及び試験終了から 24 時間経過した試料表面の撥水性を STRI 法によって評価した。また、試験前後の試料の質量を計測することによって、放電による試料の損耗量を算出した。

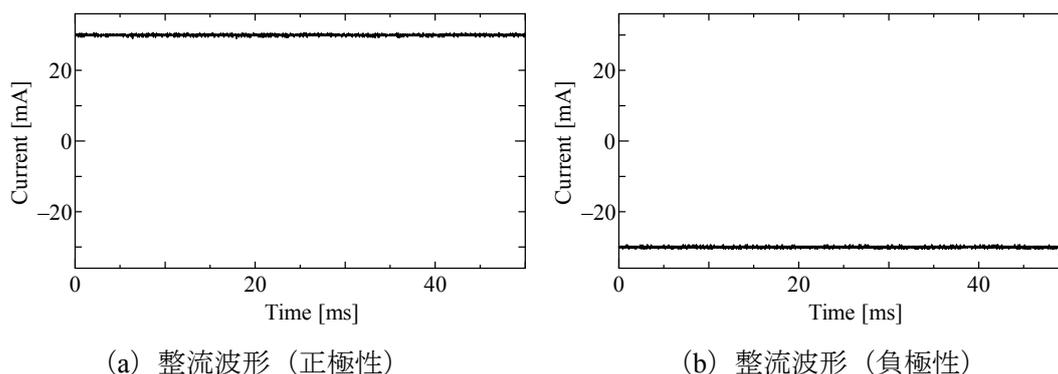


図 5.1 整流後の電流波形 (30 mA 通電時)

表 5.1 塩霧試験条件

Test time [h]	24
Applied voltage	3 kVrms, ± 3 kV
Smoothing capacitor [μ F]	50
Series resistor [$k\Omega$]	100
Detection resistor [Ω]	100
Sample size [mm \times mm \times mm]	50 \times 70 \times 2 (or 5)
Gap length [mm]	50
Chamber size [m \times m \times m]	1 \times 1 \times 1
Spray rate [l/hour]	0.6
Conductivity [mS/cm]	4

表 5.1 試料の概要

SiR	疎水化処理済み ATH 充填率 33wt%
	疎水化処理済み ATH 充填率 60wt%
LSR	A : 難燃性 離型剤有り
	B : 難燃性 離型剤無し
	C : 離型剤有り
	D : 離型剤無し

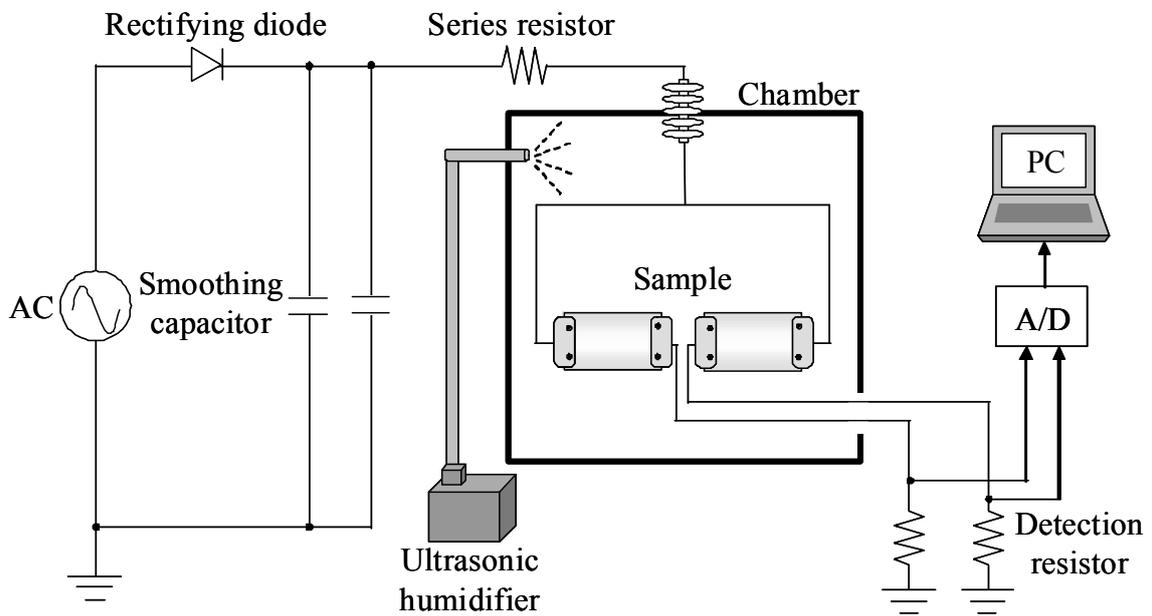


図 5.2 塩霧試験回路（直流正極性課電時）

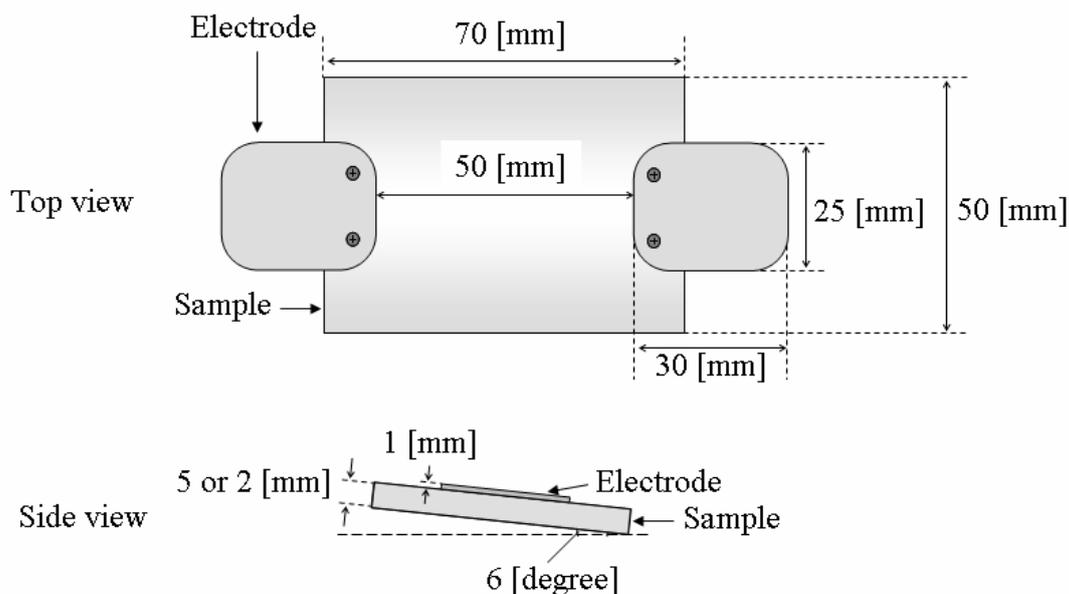


図 5.3 試料配置

5.2.2 試験結果

図 5.4 に、印加電圧の極性を変えた場合の試料表面の放電の様子を示す。実際の試験中においても同図のように、直流正極性課電時には主に接地側電極付近で、直流負極性課電時には主に課電側電極付近で局所的な激しい放電が確認された。放電が主に陰極付近に集中したのは、陰極が電子放出源となるためである⁽¹⁹⁾。一方、交流課電時は、放電によって試料表面の撥水性は低下したもののほとんど外傷はみられなかった。図 5.5 ~ 図 5.16 に、試験終了直後及び試験終了から 24 時間回復後の試料の表面状態を示す。これらは STRI 法による撥水性評価を行うために撮影したものであり、図中の数字は同評価法によって分類した撥水性クラスを示している。また、同図内の破線は、比較的激しいエロージョンが生じている箇所を示している。まず試料の撥水性に着目すると、全ての試料において試験終了から 24 時間後にはある程度撥水性が回復していることが分かる。これは、シリコーンゴムが有する撥水性の回復特性であり、低分子量成分 (LMW) の染み出しによるものである⁽²⁰⁾。

試料の損耗箇所は、上述したように、直流課電の場合にほとんどの試料の陰極近傍で激しいエロージョンが確認された。陰極付近に放電が集中したためである。また、厚みが 2 mm である SiR 試料においては、ATH 充填率 33 wt% のものでは直流で試験を実施した 6 枚中 3 枚、充填率 60 wt% のものでは 6 枚中 1 枚の試料において陰極近傍で放電による貫通破壊が確認された。一方、厚みが 5 mm の LSR 試料では、どの試料でも貫通破壊は確認されなかった。SiR 試料同士を比較すると、ATH 充填率 33 wt% の試料は充填率 60 wt% のものに比べてより多くの試料で貫通破壊が確認されるとともにその範囲も広い。一般

に, ATH の添加により耐アーク放電特性が向上するとされている。そのため, ATH 充填率の低い 33 wt% の試料の損耗量が広い範囲で起きたと考えられる。このように, 直流課電時には陰極近傍での激しいエロージョンが確認された。ただし, 特異なケースとして, 試料 B の負極性課電時 1 回目と, 試料 D の正極性課電時 3 回目において, 陽極近傍での激しいエロージョンが確認された (図 5.11 及び図 5.15 内の赤色破線部分)。

図 5.17 ~ 図 5.22 に, 試料毎の漏れ電流波高値の時間変化を示す。電圧条件が同じであれば, 試料毎の漏れ電流の特性に大きな違いはない。また, 直流課電時には見られないが, 交流課電時の多くの試料で放電開始直後に大きな波高値が観測されている。これは, 試料が水平面から 6 度という比較的緩やかな傾斜で設置されていることによって, 試料に付着した水分が流れ落ちにくかったことによる。すなわち, 試料表面にある程度塩水が溜まった時点で, 課電側電極と接地側電極が試料上の水滴を介してほとんど導通したような状態となり, 急激な漏れ電流が発生したことによるものと考えられる。

図 5.23 ~ 図 5.28 に, 累積漏れ電流電気量の時間変化を示す。交流の場合, ほとんどの試験で累積電気量の増加割合はほぼ一定であり, 最終値もほぼ等しい。一方, 直流課電の場合, 累積電気量は多くの試験で階段状に増加しており, その傾向も様々であった。直流がこのような特徴を示したのは, 直流には電圧零点が存在せず, 自然消弧しにくいいため, 短時間のうちに放電が集中したためであると考えられる。

図 5.29 は, 交・直流課電下における累積漏れ電流電気量を試料毎に示したものである。図中の「○」「△」「□」は課電条件毎の平均値を表し, 「×」は実測値を表している。交流課電時には, いずれの試料でもほとんどばらつきはなく, 平均値は約 50 C であった。一方, 直流課電時は, 正極性, 負極性ともに大きくばらつく結果となり, 試料毎の特徴は特に見出せない。ここで, 直流課電による電気量については単純平均の場合で交流課電時の約 2 倍の 100 C 程度となる。また, 電気量について, 直流課電時の場合が交流課電時を上回っていることから, この結果は, 直流放電が発生した場合, その電気量は, 少なくとも交流放電による電気量と同等か, それ以上の値になるということを示唆している。

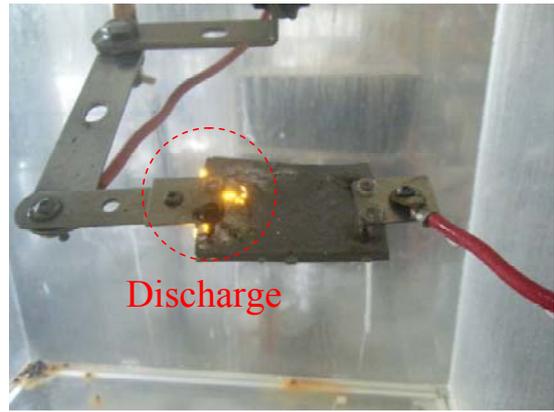
図 5.30 は, 交・直流課電下における試験直後及び試験終了から 24 時間回復後の撥水性クラスを試料毎に示したものである。図中の「●」「▲」「■」は課電条件毎の平均値を表し, 「×」は実測値を表している。また, 各試験結果について, 点線に対して左側のプロットは試験終了直後の試料の撥水性クラスを, 右側のプロットは試験終了から 24 時間室温で保存した後の撥水性クラスをそれぞれ示している。まず, 直流と交流の結果を比較すると, 全体的に, 試験終了直後の撥水性は直流課電時より交流課電時の方が若干良好であることが分かる。これは, 直流の方が交流より放電が継続しやすいため, 試料に与える影響が大きかったことが原因であると考えられる。次に, 試料の種類毎の結果を比較すると, 試験後の撥

水性の回復については、SiR 試料より LSR 試料の方が全体的に良好であった。これは、試料を構成している線状ポリマーの重合度の違いによるものと考えられる。SiR 試料は高温加硫型シリコーンゴム (high temperature vulcanized silicone rubber : HTV) で重合度が 5,000~10,000 であるのに対して、LSR (liquid silicone rubber : LSR) 試料の重合度は 100~2,000 である⁽⁸⁾。重合度の小さい LSR の方が低分子量成分の拡散性が高く、撥水性消失後の試料表面への低分子量成分の染み出しが速かったものと考えられる。なお、全ての試料の撥水性は回復時間中にある程度回復したものの、24 時間では試料の有する初期の撥水性クラス (HC1) までは回復しなかった。しかし、その後、72 時間~96 時間程度でほとんどの試料において、HC1 程度までの回復が確認された。

図 5.31 は、交・直流課電下における放電による試料の損耗量を試料毎に示したものである。図中の棒グラフは課電条件毎の平均値を表し、「×」は実測値を表している。交流課電の場合、ほとんどの試料は損耗していないが、直流の場合には損耗量が非常に大きい。直流の場合、ほとんどの試料の損耗量は交流課電時の 10 倍以上となっている。このように直流課電と交流課電時において、試料の劣化に大きな違いが生じたのは、前述したように、直流アークは電圧零点が存在しないことから自然消弧しにくく、アークの継続時間が比較的長くなりやすいために試料の特定箇所には大きな放電エネルギーを与えたためであると考えられる⁽²¹⁾。なお、ATH は耐エロージョン性能を向上させることを目的とした充填剤であり、充填量が多ければ放電による損耗量は減少するはずである。しかし、図 5.31 から明らかなように、そのような関係はない。ATH33 wt%充填の試料は図 5.5 及び図 5.6 で示したように広い範囲で貫通破壊が起こっている。試料に十分な厚みがあれば損耗が進行すべきところが、貫通している箇所をギャップとして発生した放電は試料に直接影響を及ぼさないため、損耗量の飽和のような現象が生じてしまったものと考えられる。また、それ以外の試料の結果を直流課電同士で比較しても、結果のばらつきが大きく、はっきりとした傾向は見出せなかった。



(a) 直流正極性



(b) 直流負極性



(c) 交流

図 5.4 試料表面における放電の様子

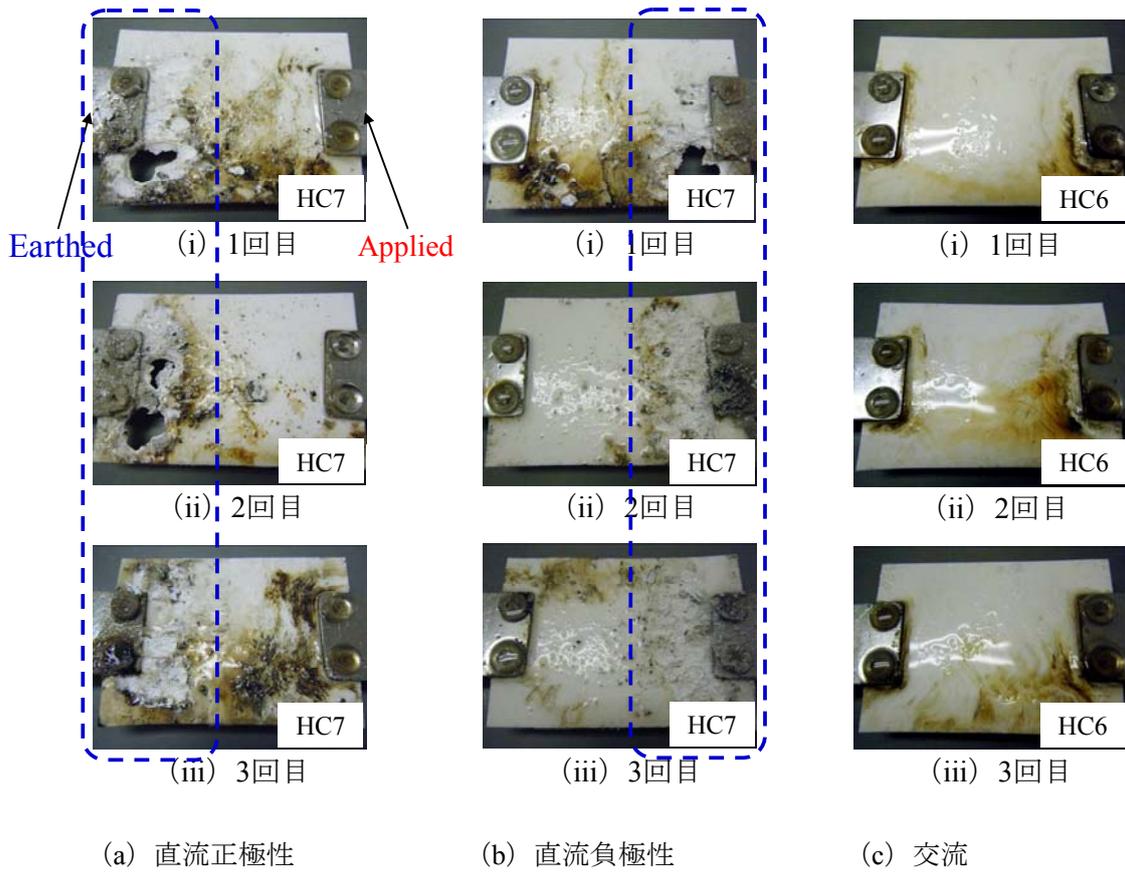


図 5.5 試験終了直後の試料の様子 (ATH 充填率 33 wt%)

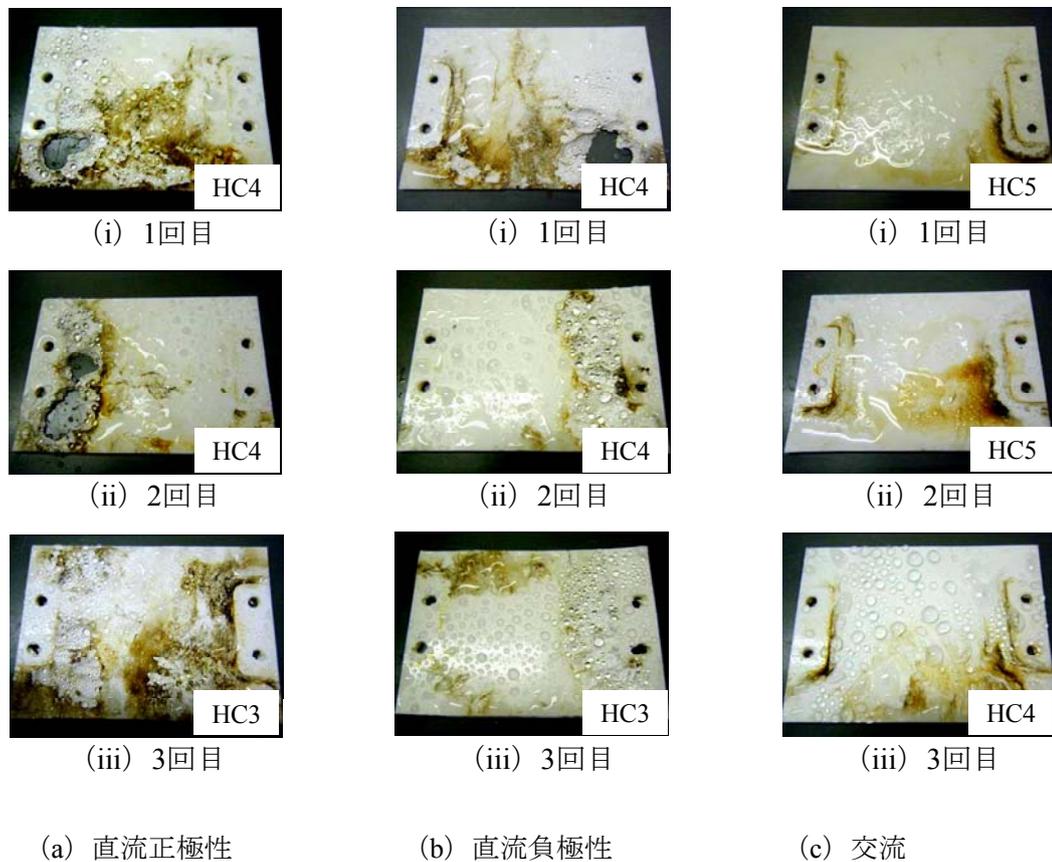


図 5.6 24 時間回復後の試料の様子 (ATH 充填率 33 wt%)

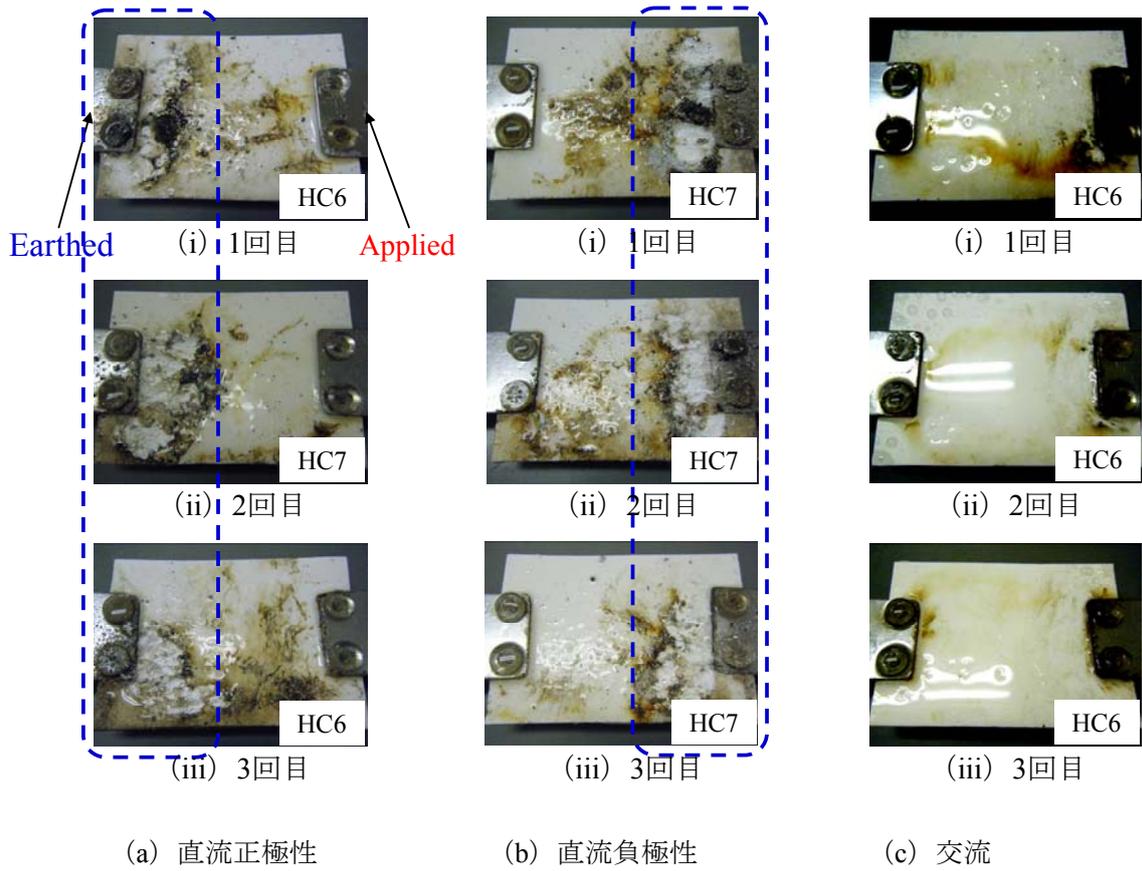


図 5.7 試験終了直後の試料の様子 (ATH 充填率 60 wt%)

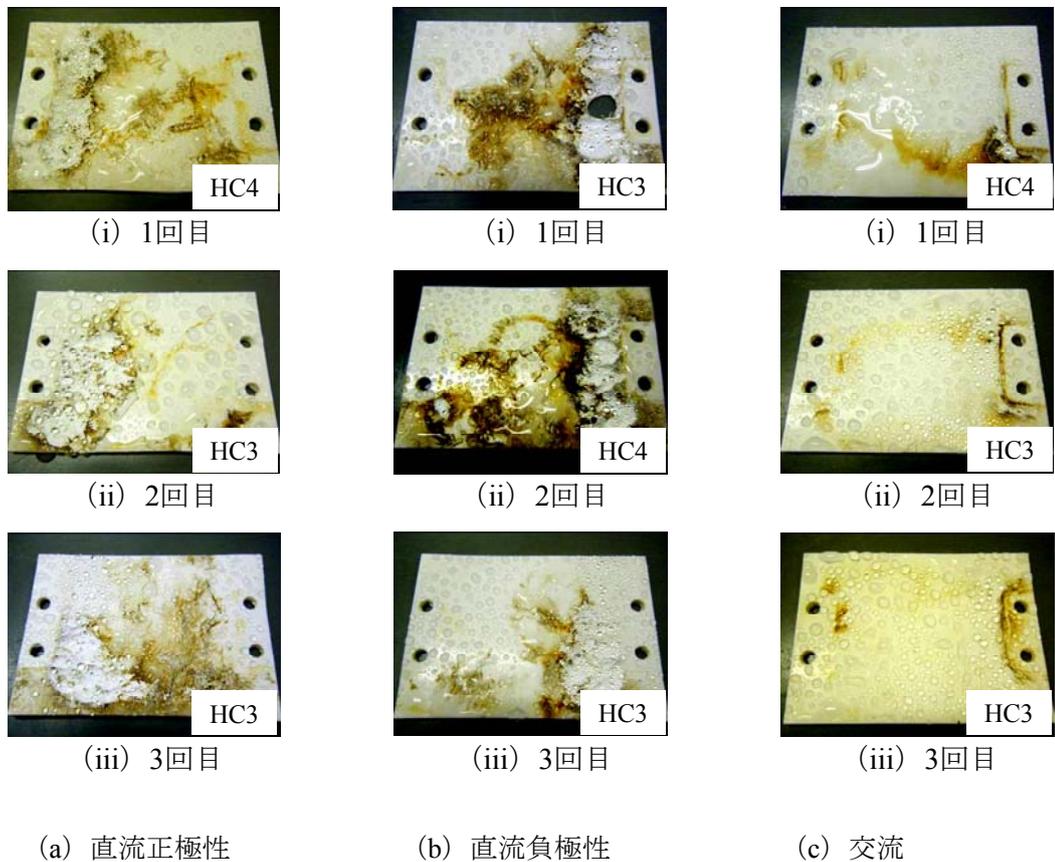


図 5.8 24 時間回復後の試料の様子 (ATH 充填率 60 wt%)

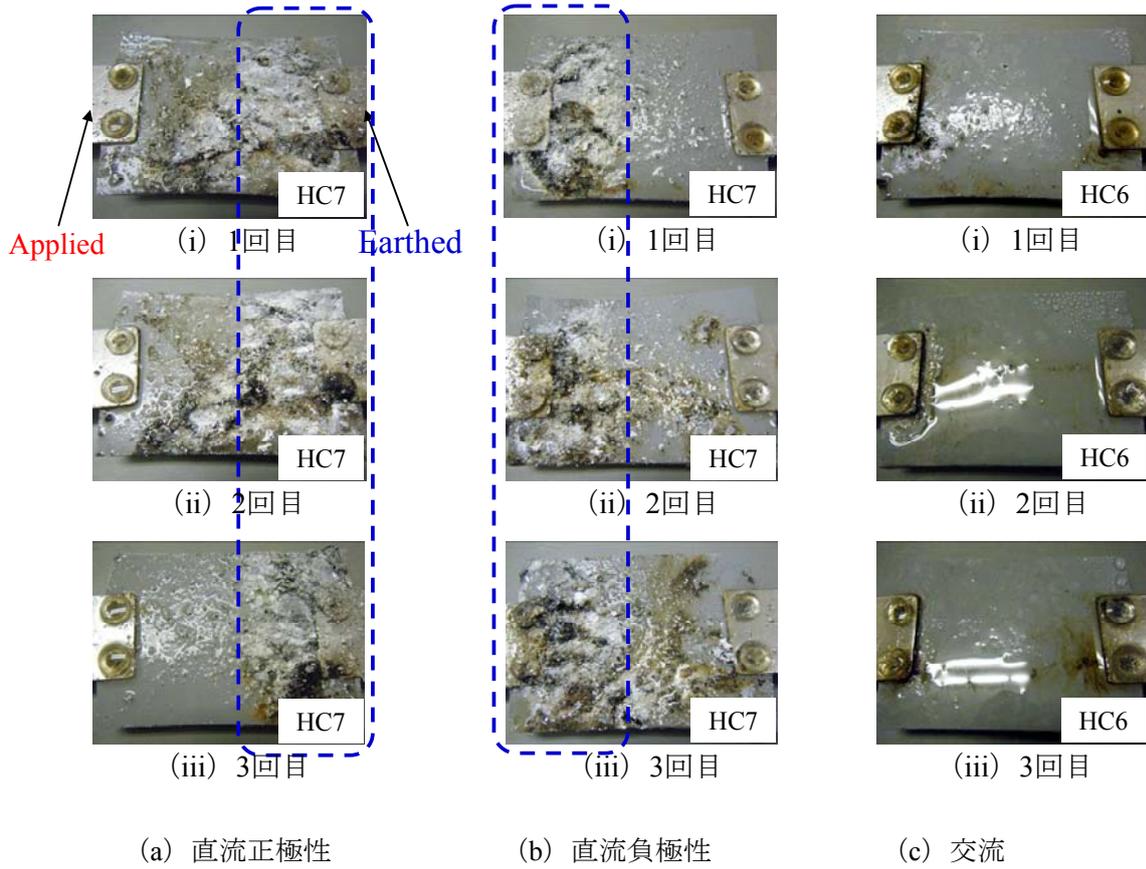


図 5.9 試験終了直後の試料の様子 (試料 A)

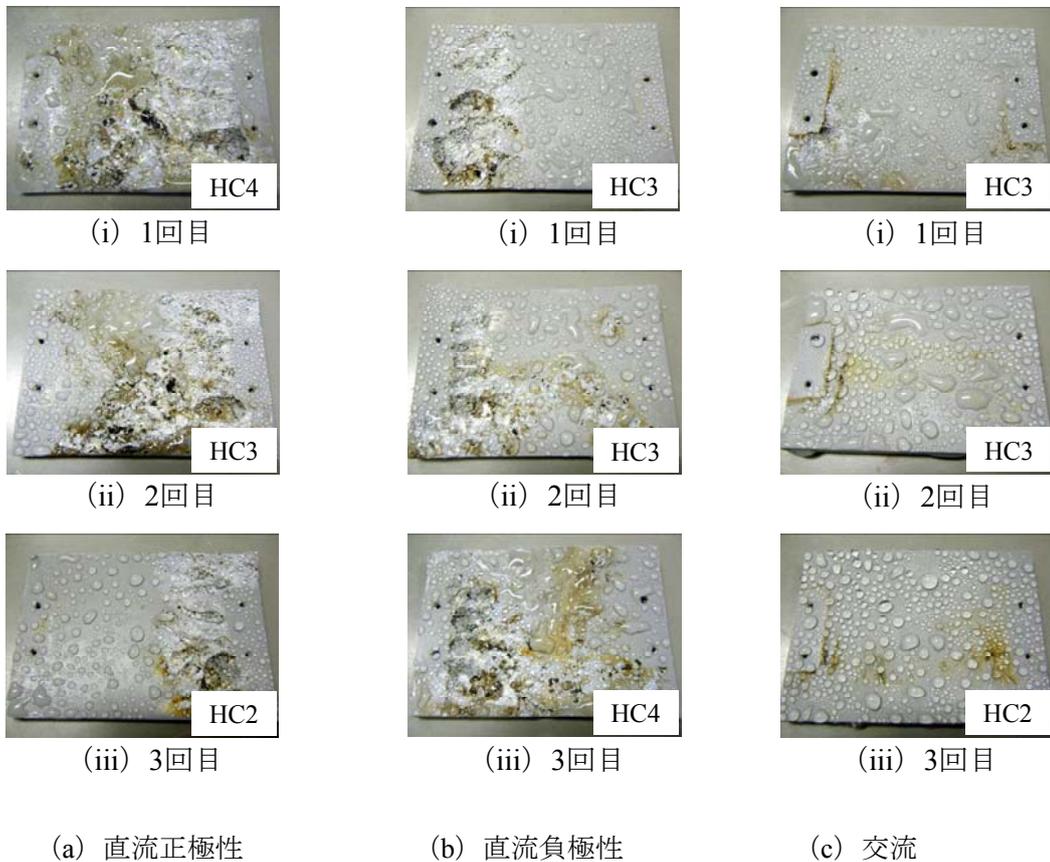


図 5.10 24 時間回復後の試料の様子 (試料 A)

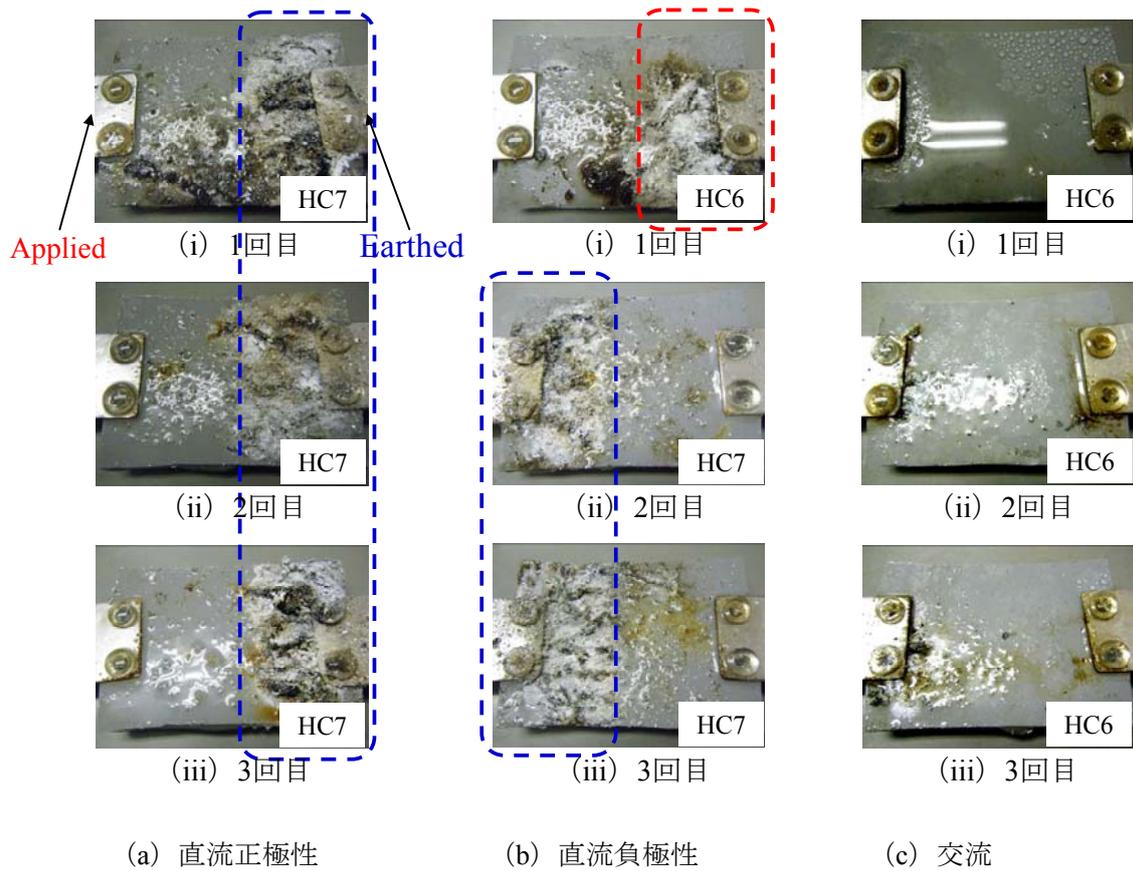


図 5.11 試験終了直後の試料の様子 (試料 B)

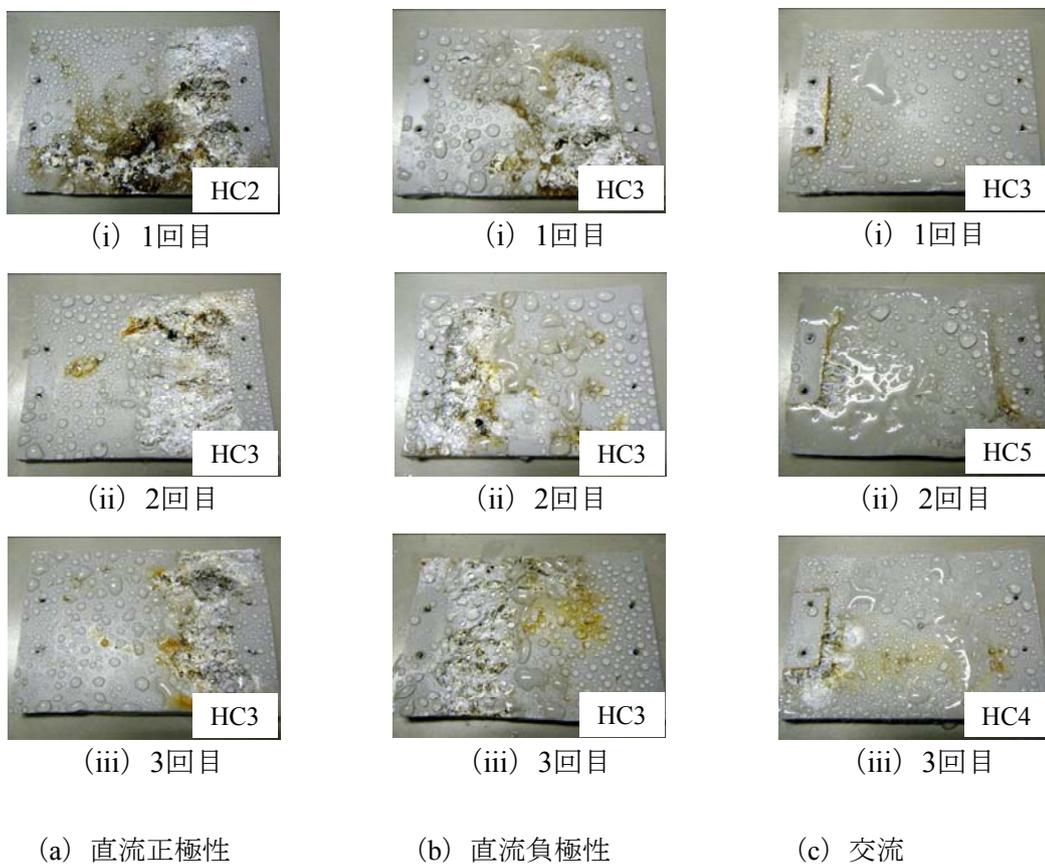


図 5.12 24 時間回復後の試料の様子 (試料 B)

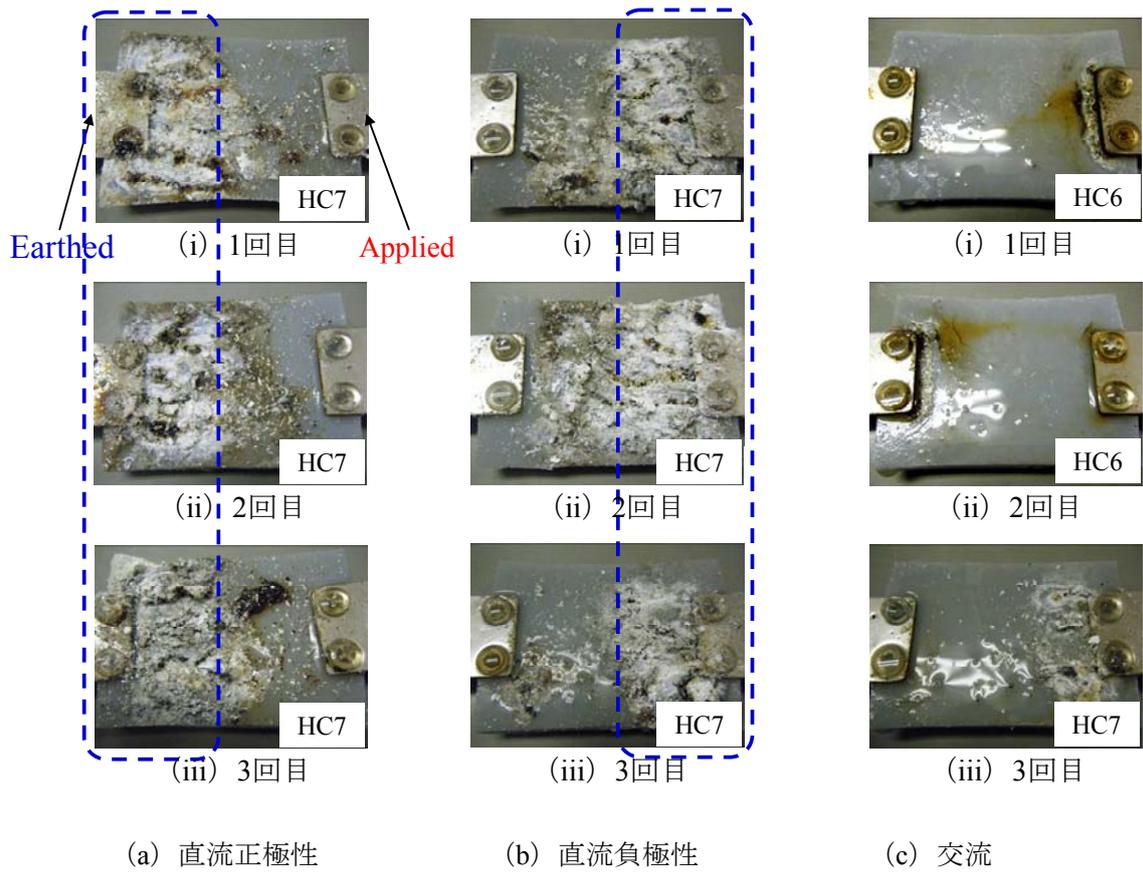


図 5.13 試験終了直後の試料の様子 (試料 C)

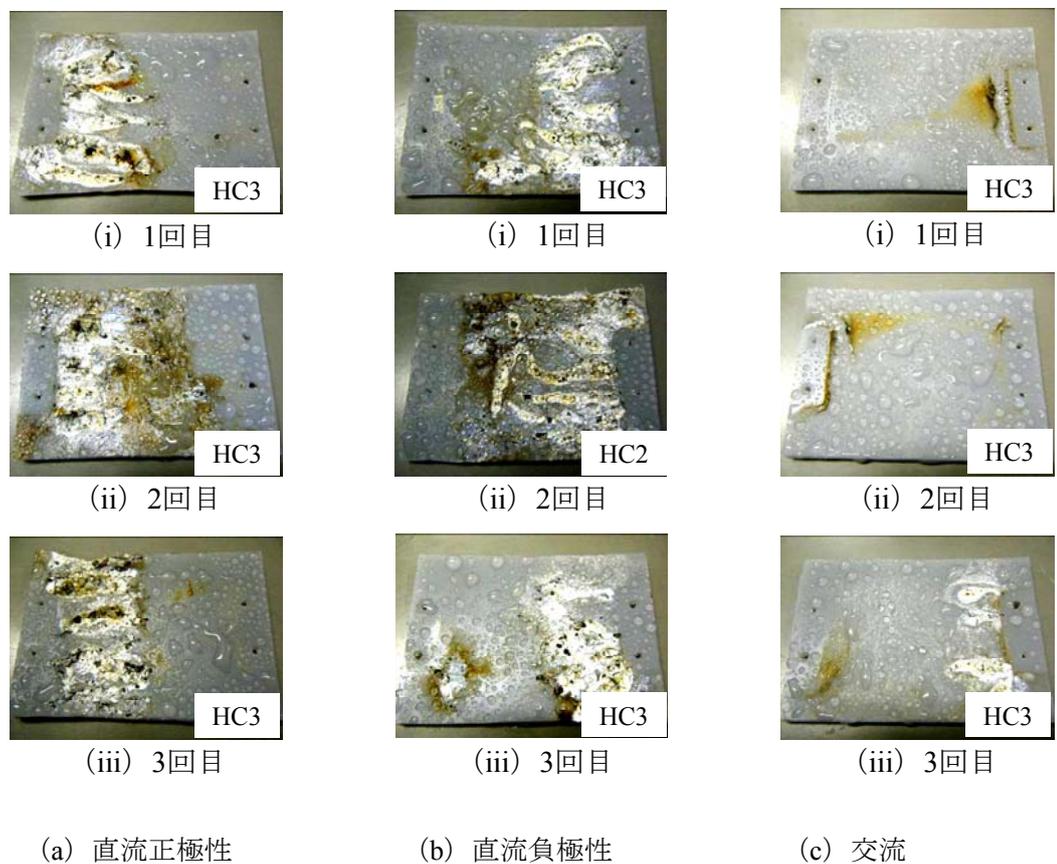


図 5.14 24 時間回復後の試料の様子 (試料 C)

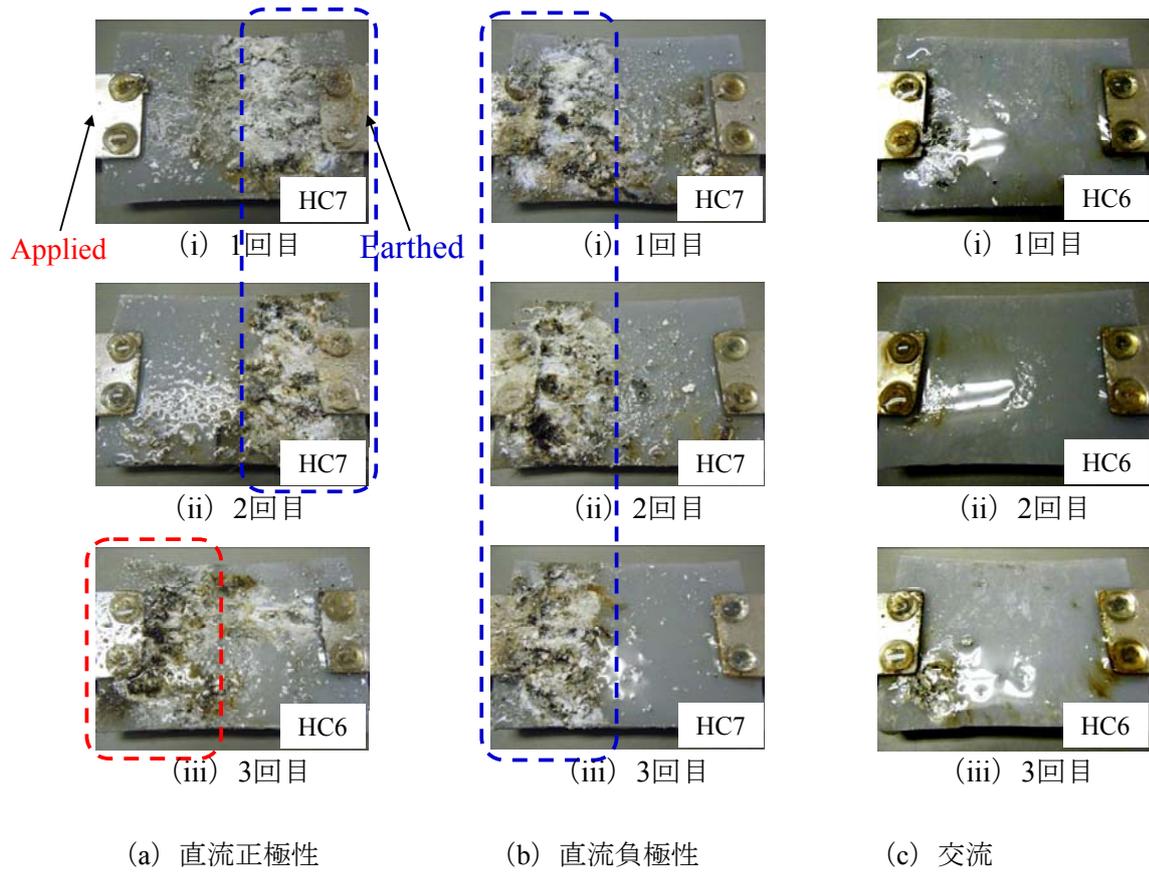


図 5.15 試験終了直後の試料の様子 (試料 D)

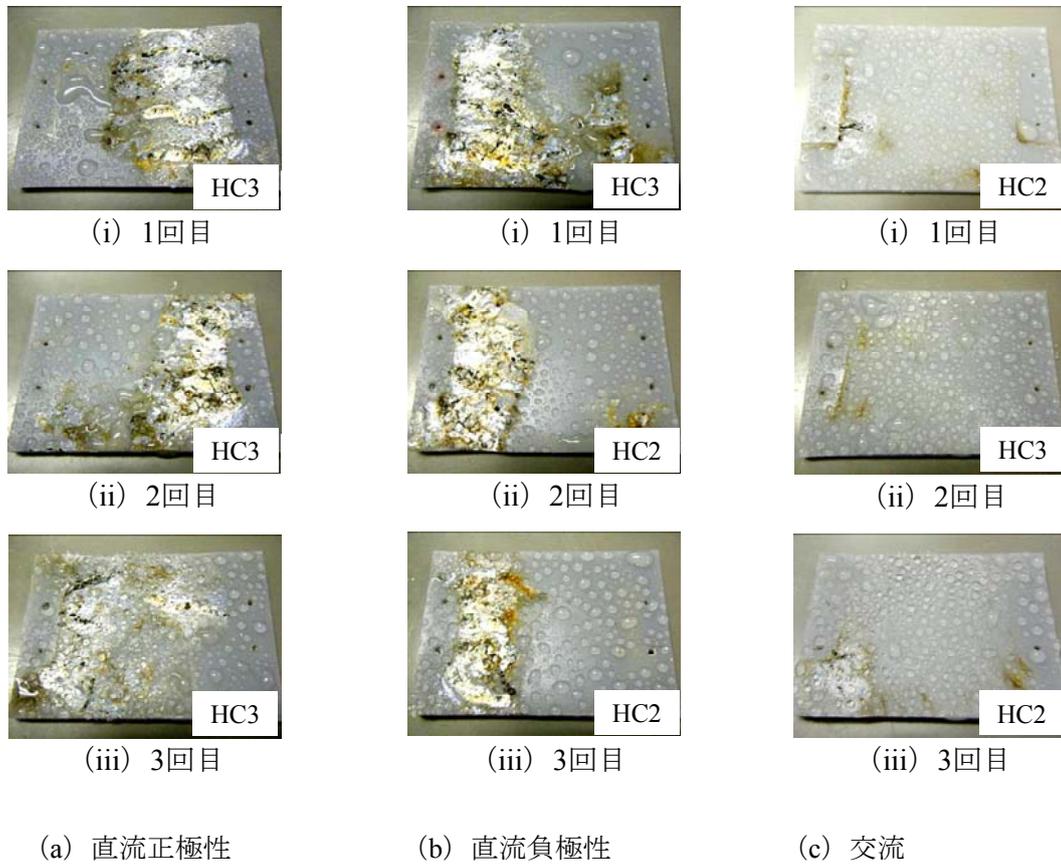


図 5.16 24 時間回復後の試料の様子 (試料 D)

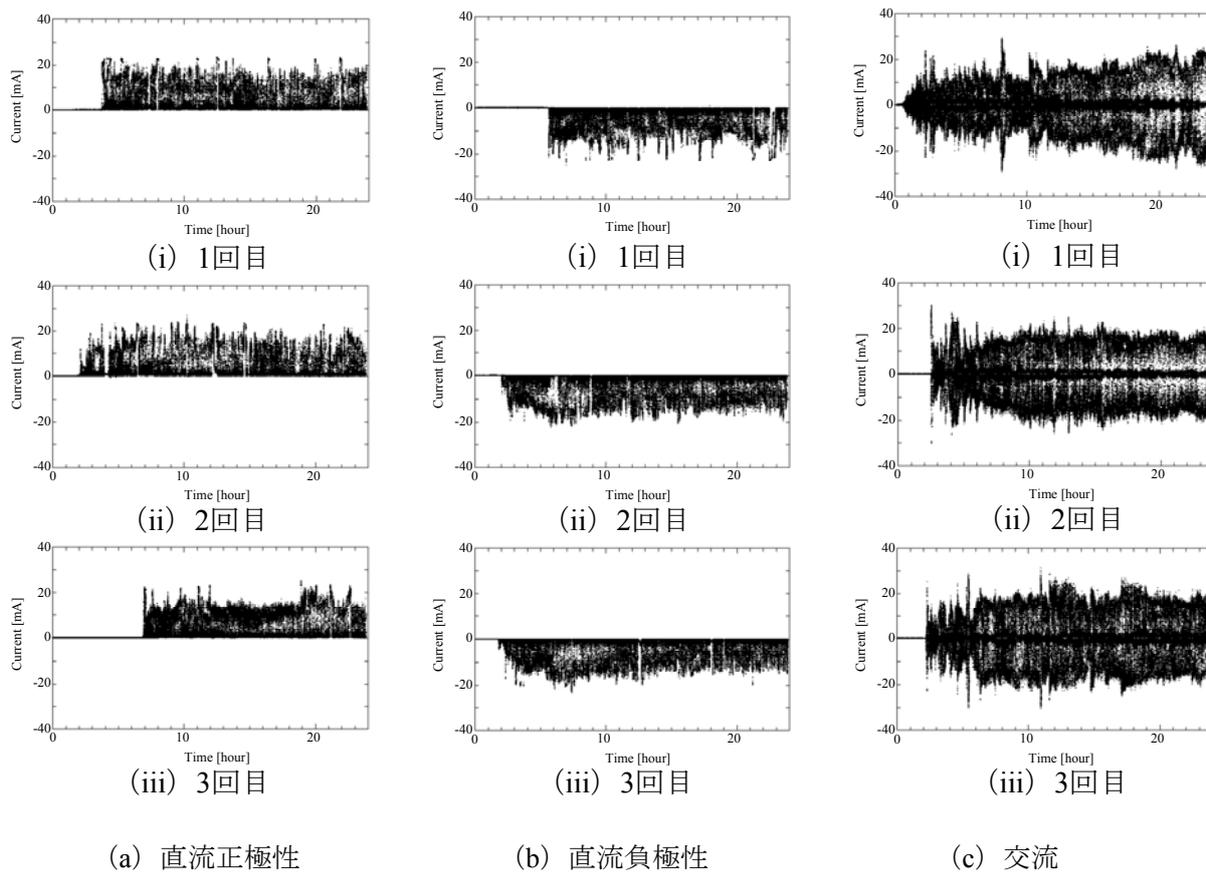


図 5.17 波高値の時間変化 (ATH 充填率 33 wt%)

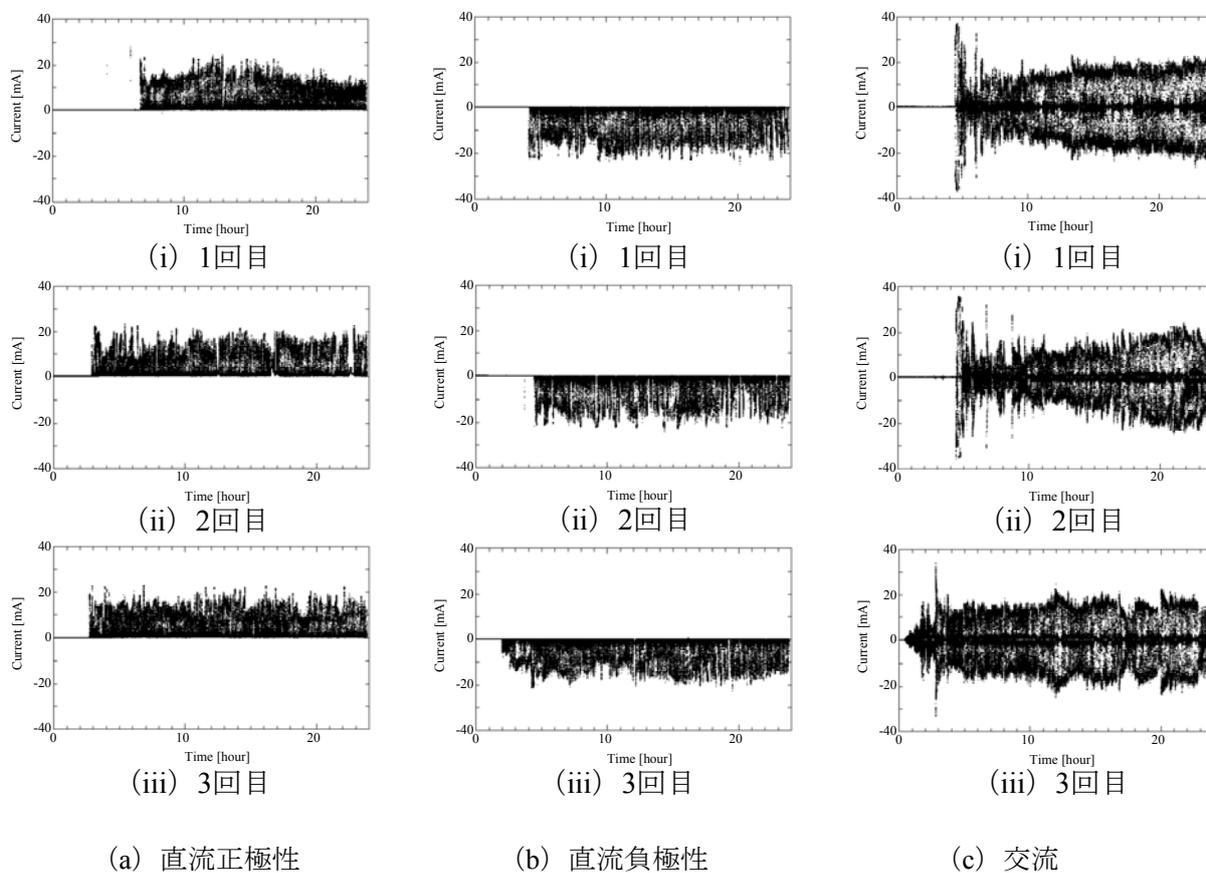


図 5.18 波高値の時間変化 (ATH 充填率 60 wt%)

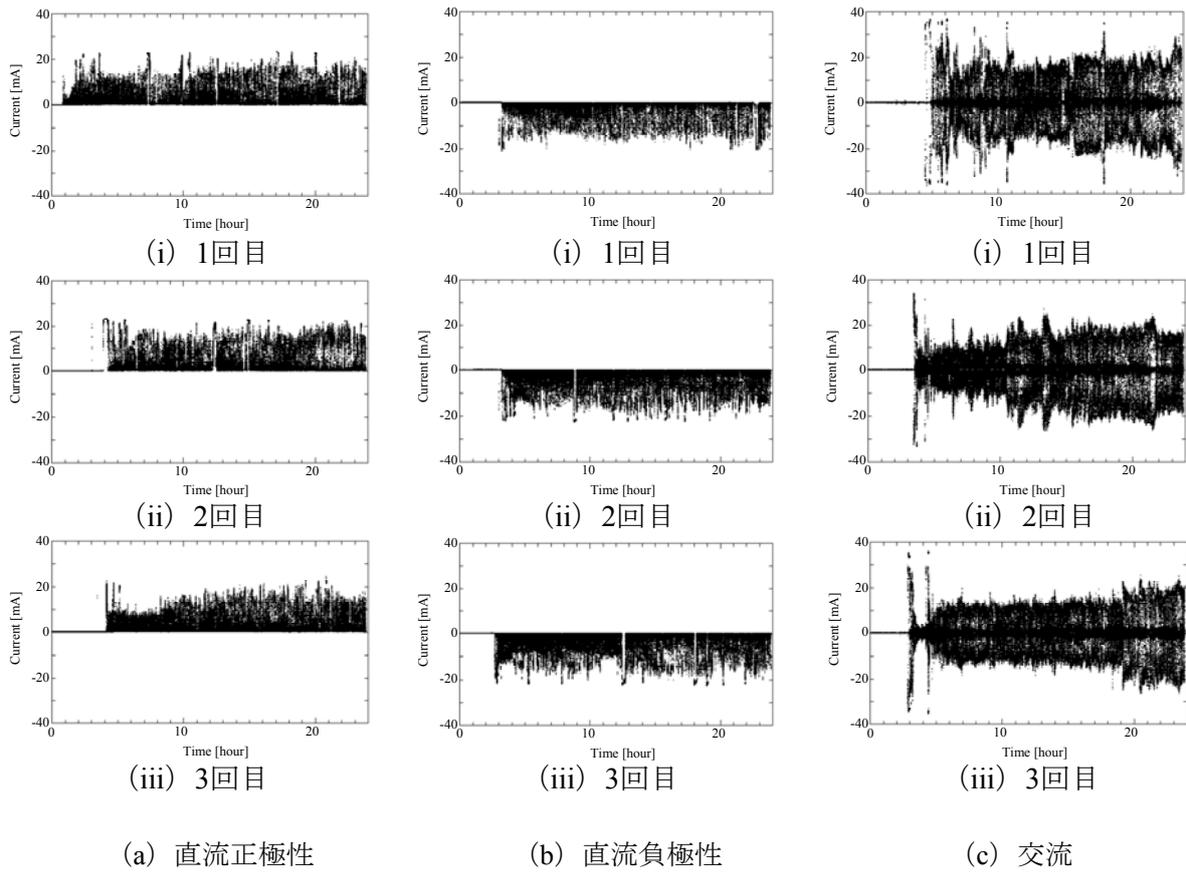


図 5.19 波高値の時間変化 (試料 A)

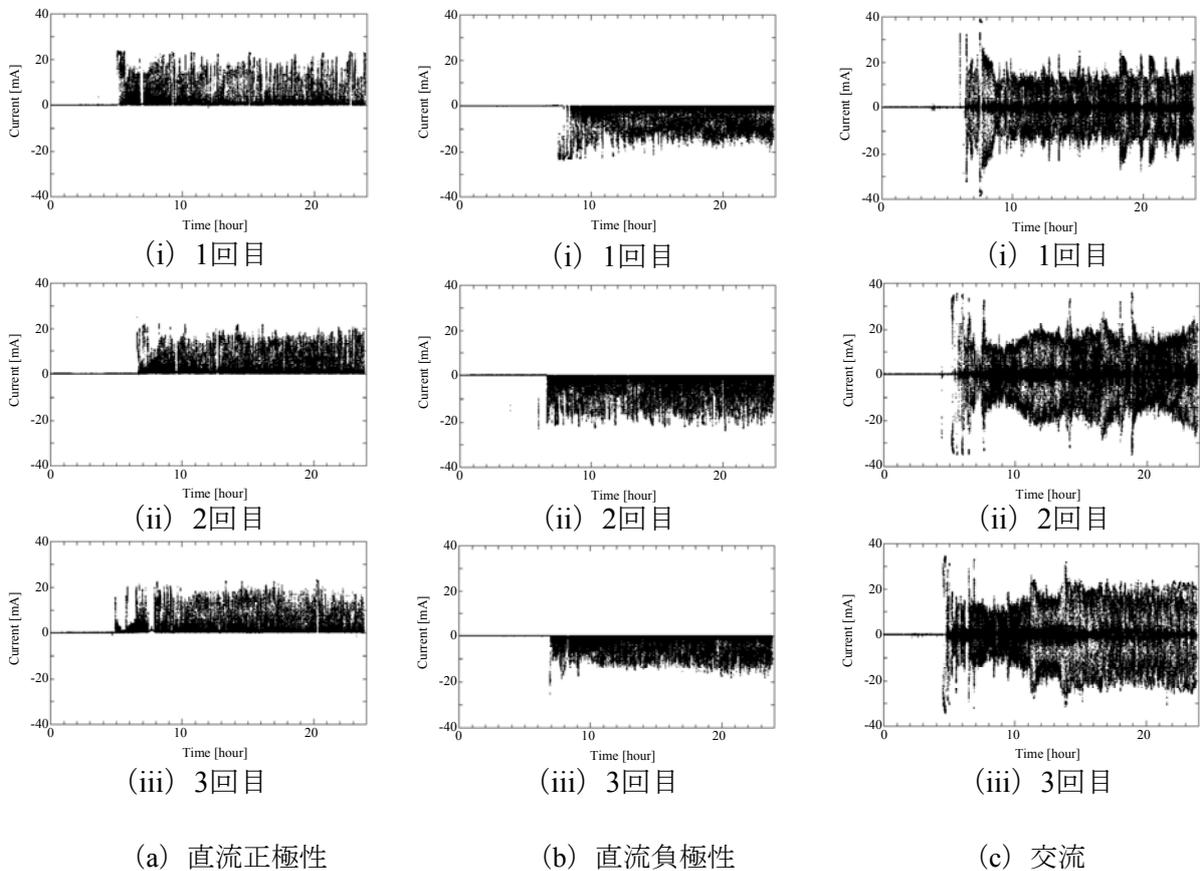


図 5.20 波高値の時間変化 (試料 B)

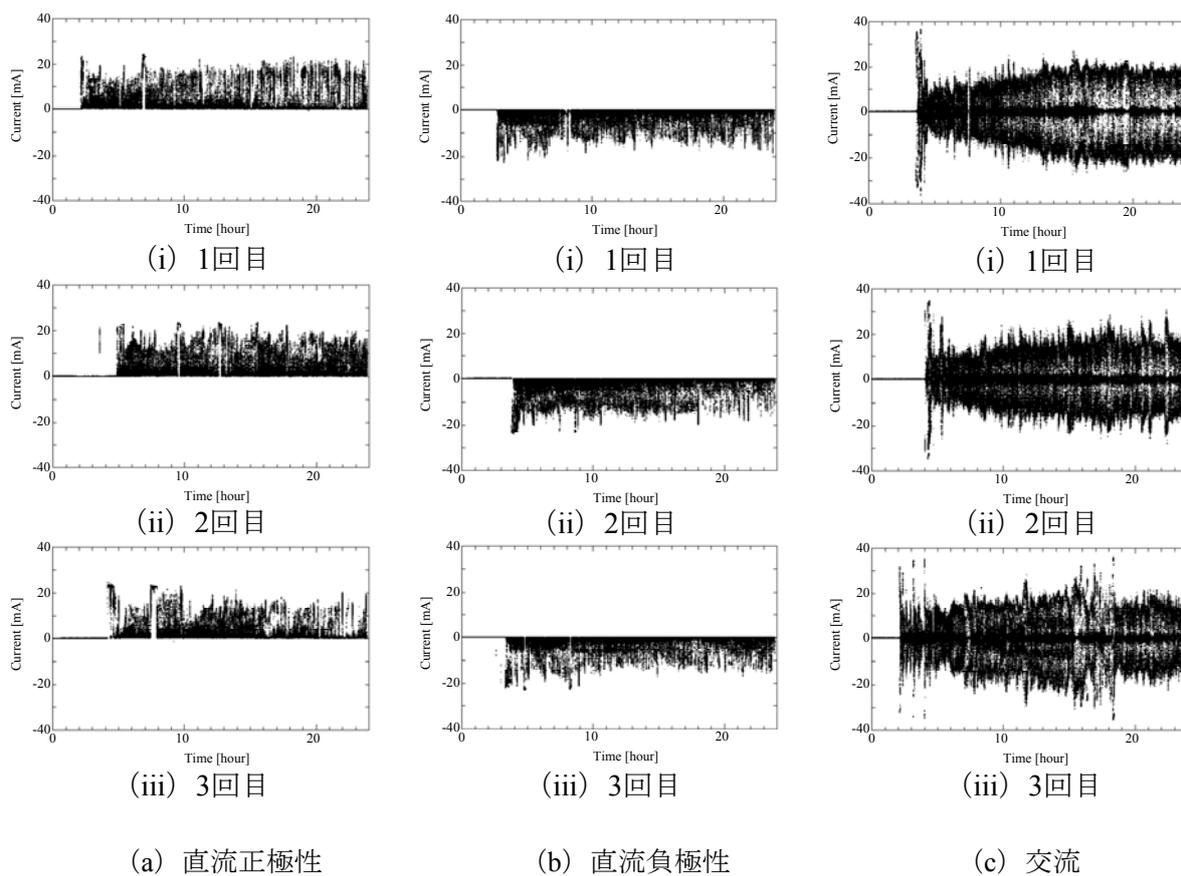


図 5.21 波高値の時間変化 (試料 C)

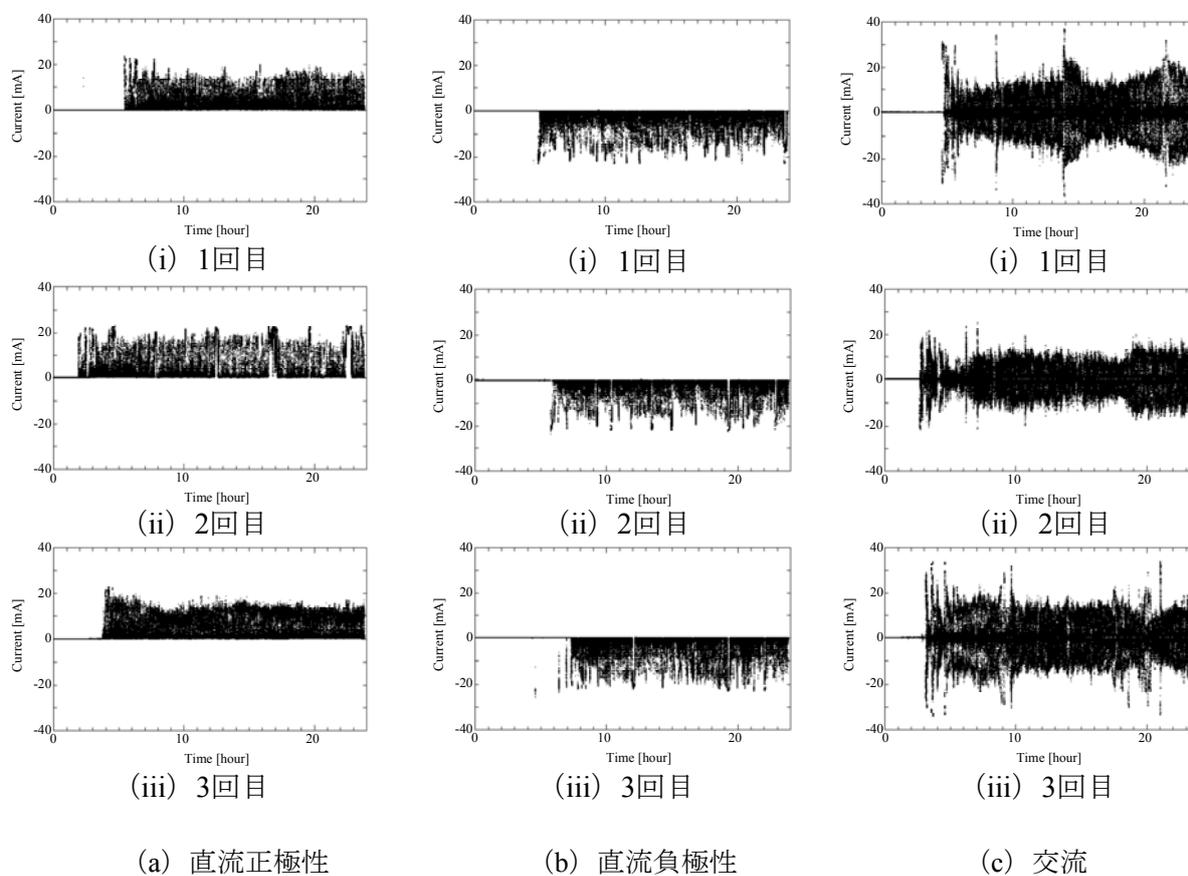
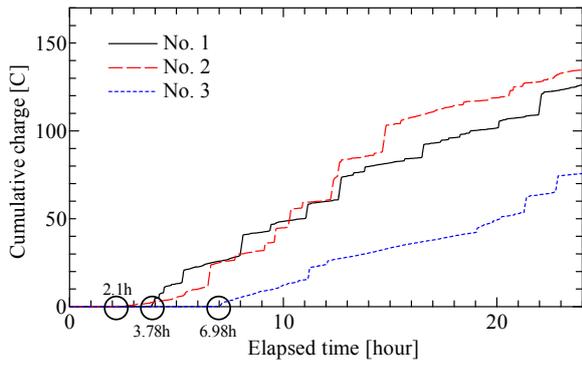
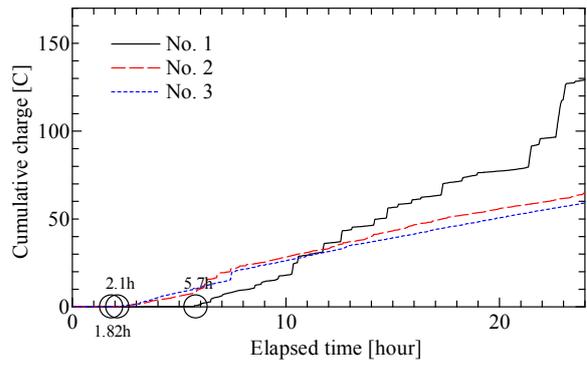


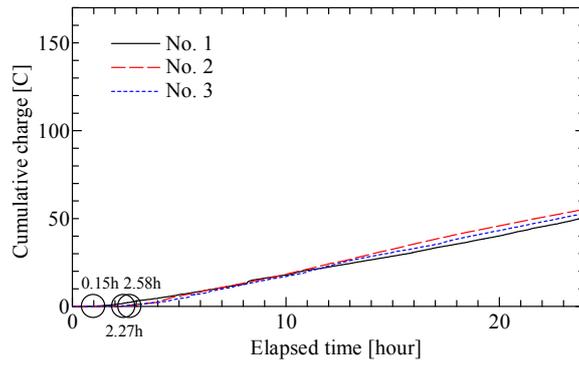
図 5.22 波高値の時間変化 (試料 D)



(a) 直流正極性

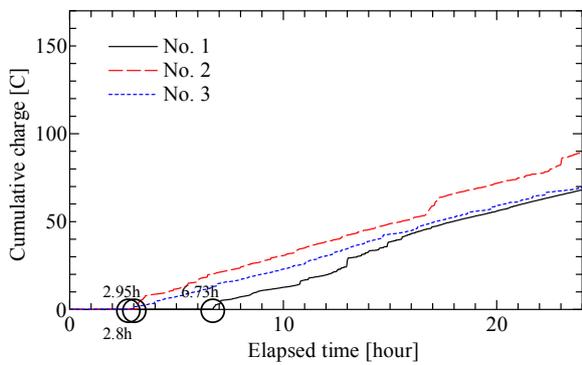


(b) 直流負極性

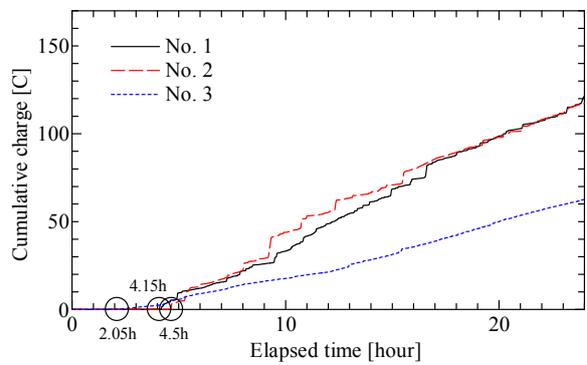


(c) 交流

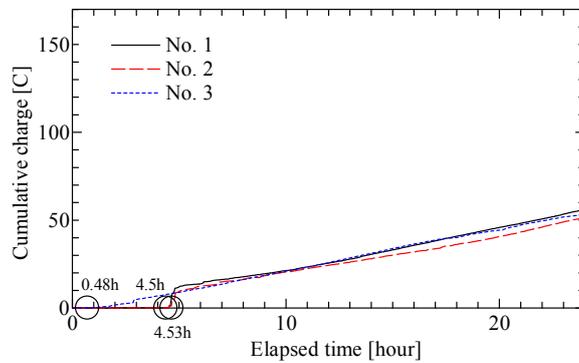
図 5.23 累積漏れ電流電気量の時間変化 (ATH 充填率 33 wt%)



(a) 直流正極性

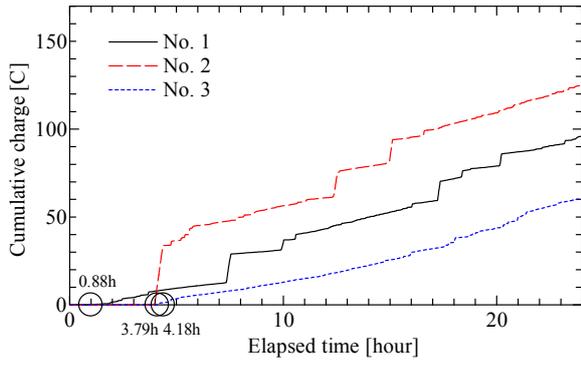


(b) 直流負極性

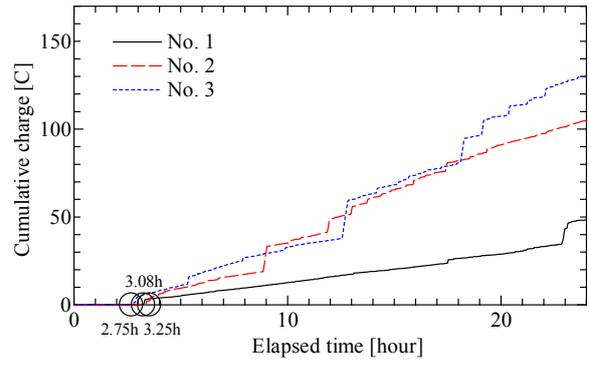


(c) 交流

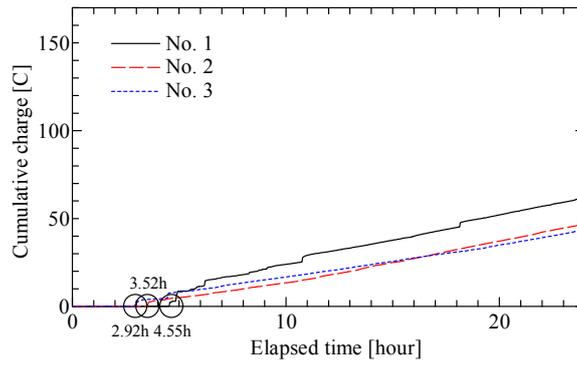
図 5.24 累積漏れ電流電気量の時間変化 (ATH 充填率 60 wt%)



(a) 直流正極性

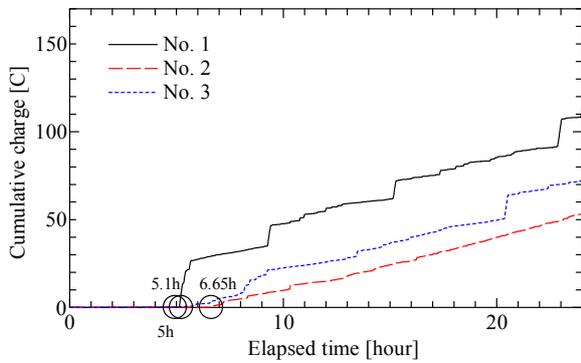


(b) 直流負極性

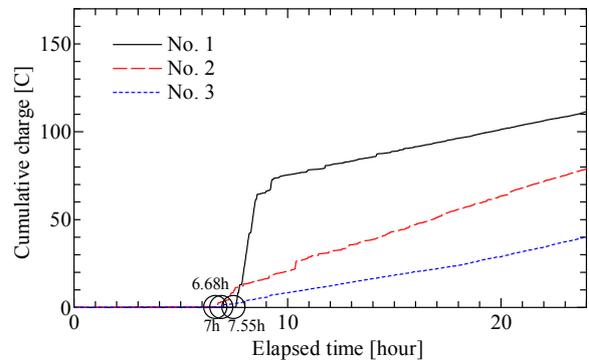


(c) 交流

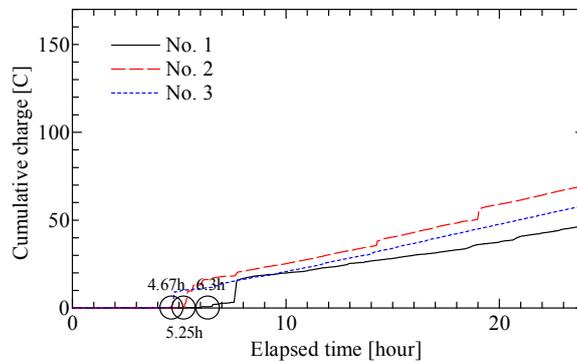
図 5.25 累積漏れ電流電気量の時間変化 (試料 A)



(a) 直流正極性

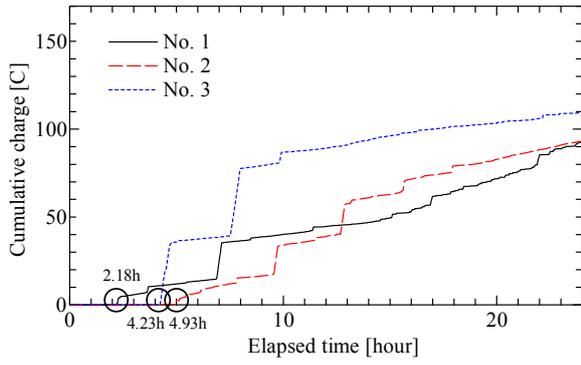


(b) 直流負極性

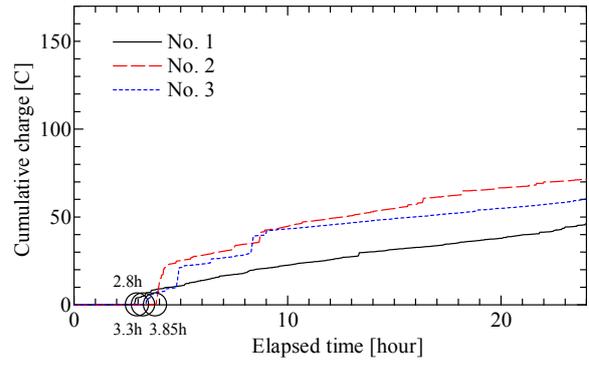


(c) 交流

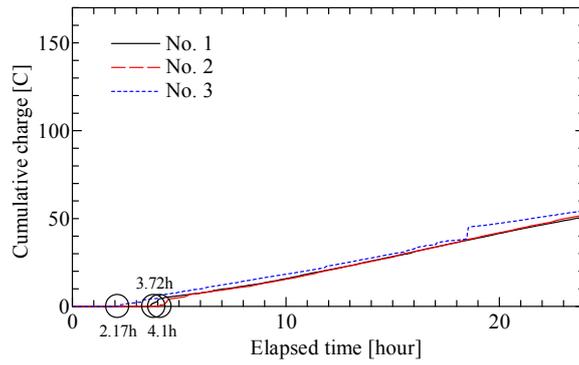
図 5.26 累積漏れ電流電気量の時間変化 (試料 B)



(a) 直流正極性

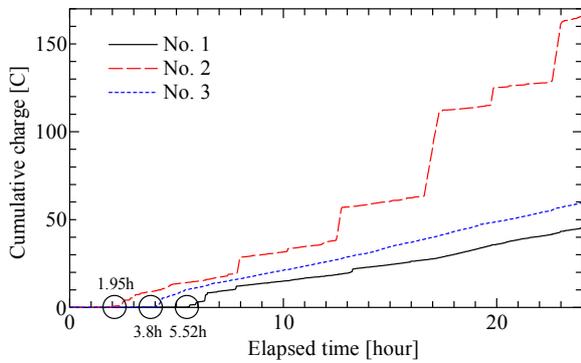


(b) 直流負極性

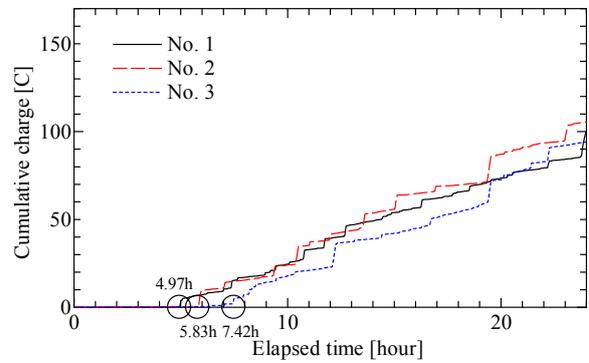


(c) 交流

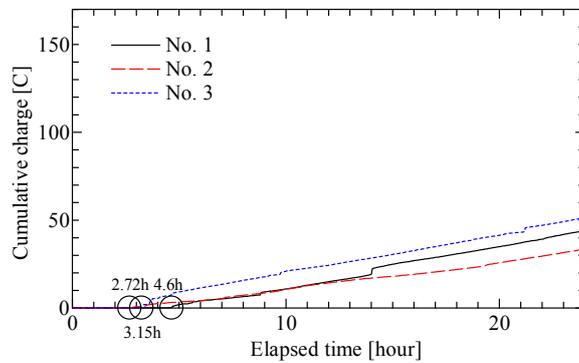
図 5.27 累積漏れ電流電気量の時間変化 (試料 C)



(a) 直流正極性



(b) 直流負極性



(c) 交流

図 5.28 累積漏れ電流電気量の時間変化 (試料 D)

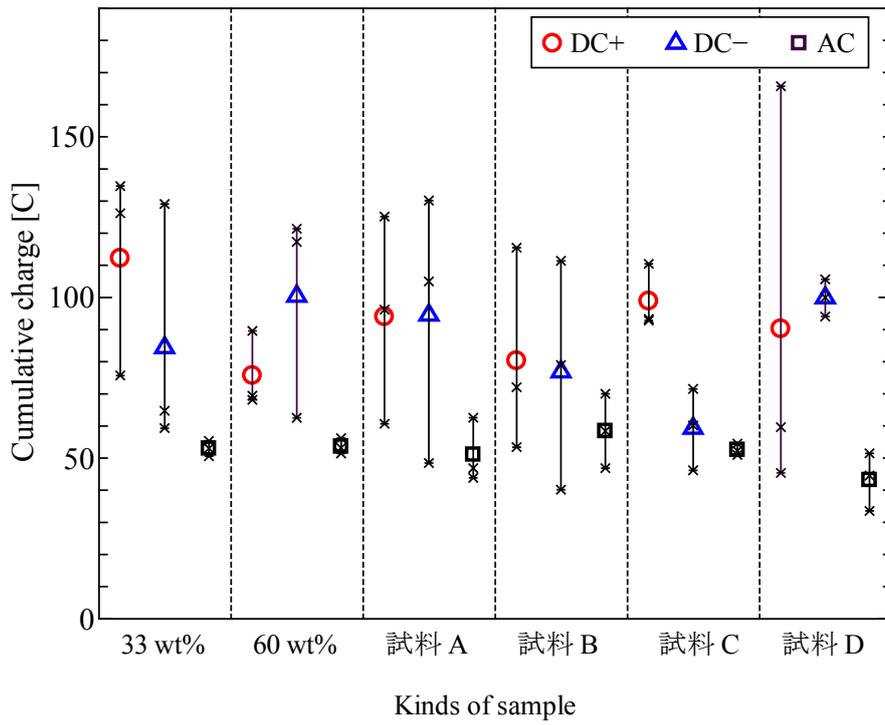


図 5.29 試験中の累積漏れ電流電気量

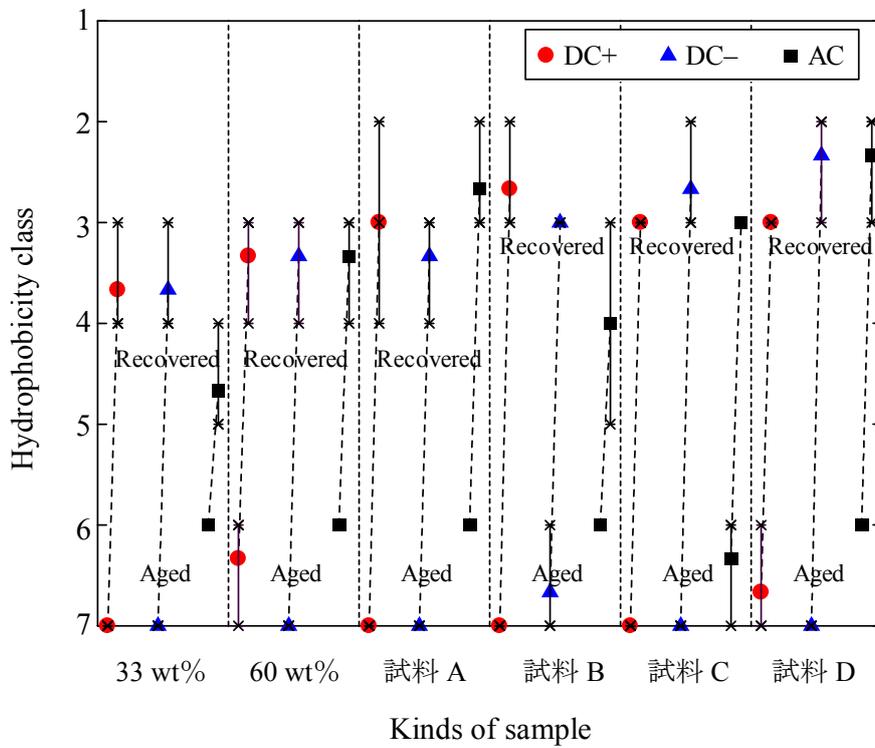


図 5.30 試験終了直後及び 24 時間回復後の撥水性クラス

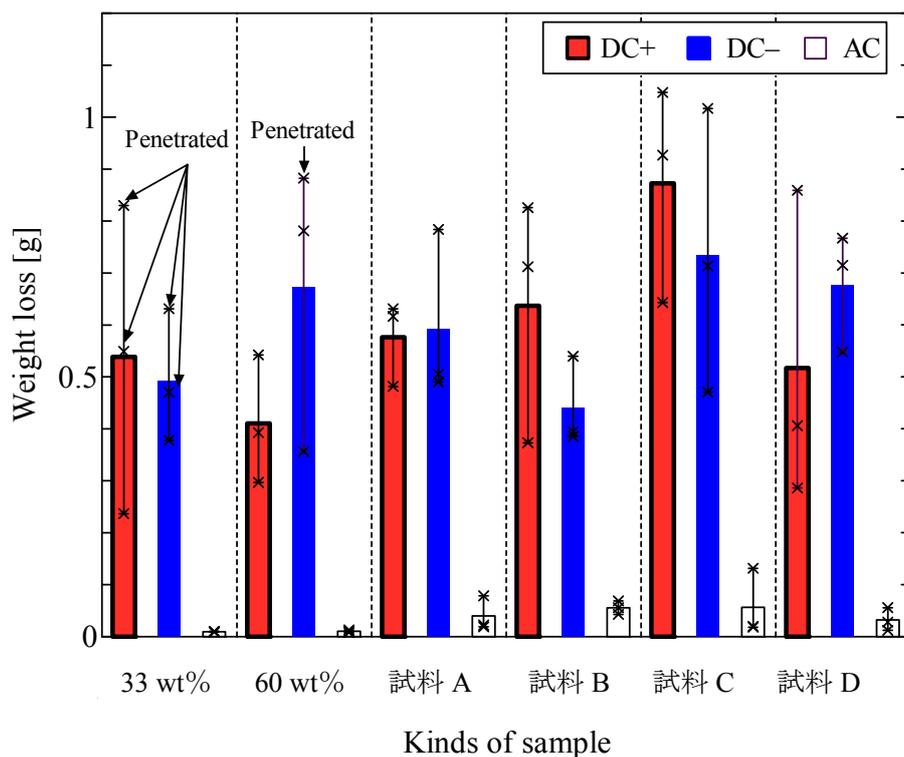


図 5.31 放電による試料の損耗量

5.3 試料表面の撥水性への影響

5.3.1 Dynamic Drop Test

5.3.1.1 Dynamic Drop Test の概要

国際大電力システム会議(International Council on Large Electric Systems, CIGRE)ではポリマー材料の屋外電気絶縁に関する劣化・性能評価法についての検討を進めている。そこで、Bärsch 等は、小規模且つ容易に撥水性の消失特性を評価可能な試験法である Dynamic Drop Test (:DDT)を提案した⁽²²⁾。この試験法は、電界を加えた試料に水滴を継続的に滴下し撥水性の消失を評価するものである。CIGRE の提案する DDT の試験条件を表 5.2 に示す。

表 5.2 CIGRE の提案する試験条件

Test voltage[kVrms]	4±0.1
Test liquid	Deionized or distilled water with NaCl
Conductivity [mS/cm]	1.5±0.2
Temperature of test liquid [deg C]	23±3
Drop rate [drops/min]	12±1
Test time [h]	Within 24

5.3.1.2 撥水性消失までの過程

図 5.32 に、試験開始から終了までの漏れ電流波形の例を示す。また、図 5.33 に撥水性消失前後の漏れ電流波形の例を示す。なお、CCD カメラの映像から、水滴滴下開始後から時間の経過とともに試料表面の撥水性が低下して水滴形状が長くなることを確認している⁽²⁰⁾。また、水滴形状が長くなるようになると、試料表面には水滴が付着・残存し始める。図 5.34 に示すような試料表面にある程度水滴が付着した時点で、水滴間での微小放電の発生が確認された。その放電の様子を図 5.35 に示す。図中の円で囲んだ部分に微小放電が発生した。微小放電の発生後は試料表面の撥水性が著しく低下し、図 5.36 に示すような数 mA 以上の持続放電が確認された。

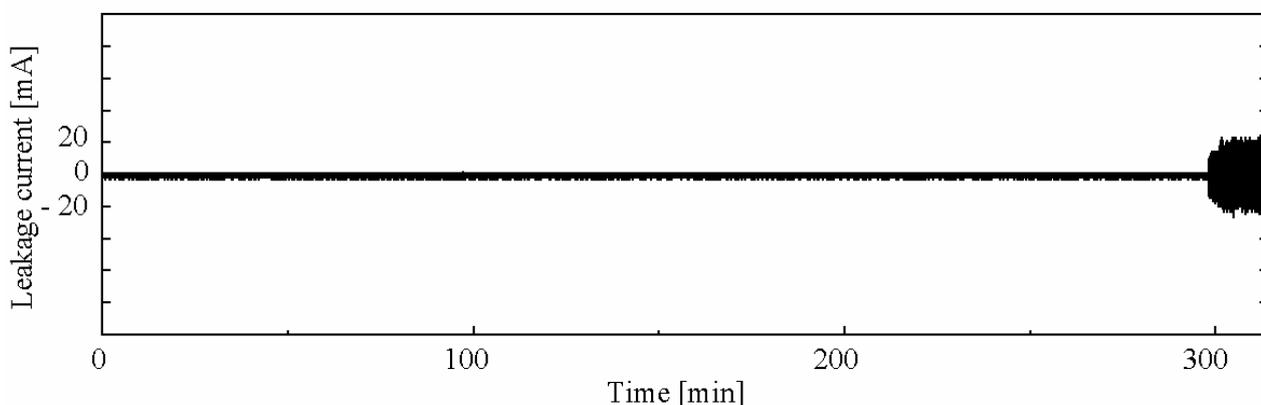


図 5.32 電流波形(試験開始から終了まで)

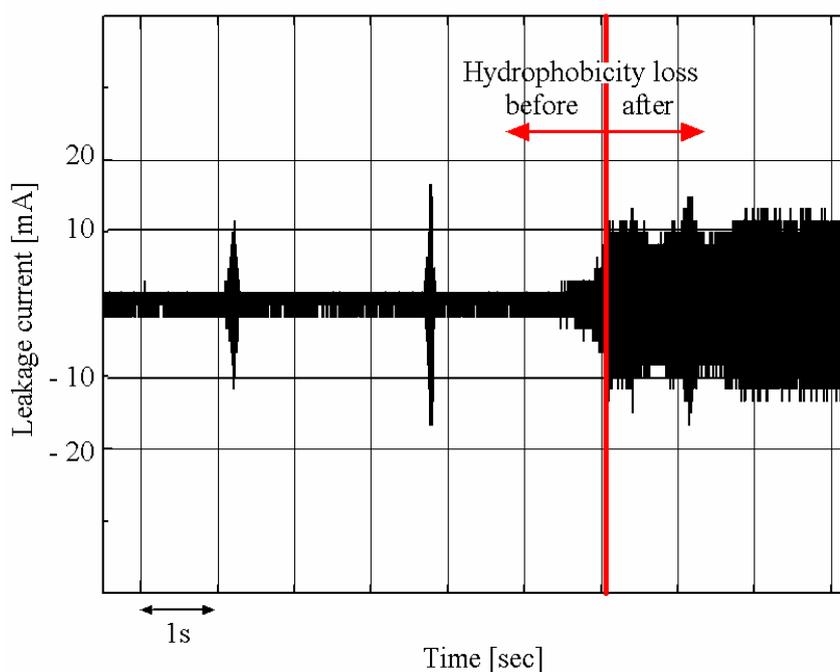


図 5.33 電流波形(撥水性消失前後)

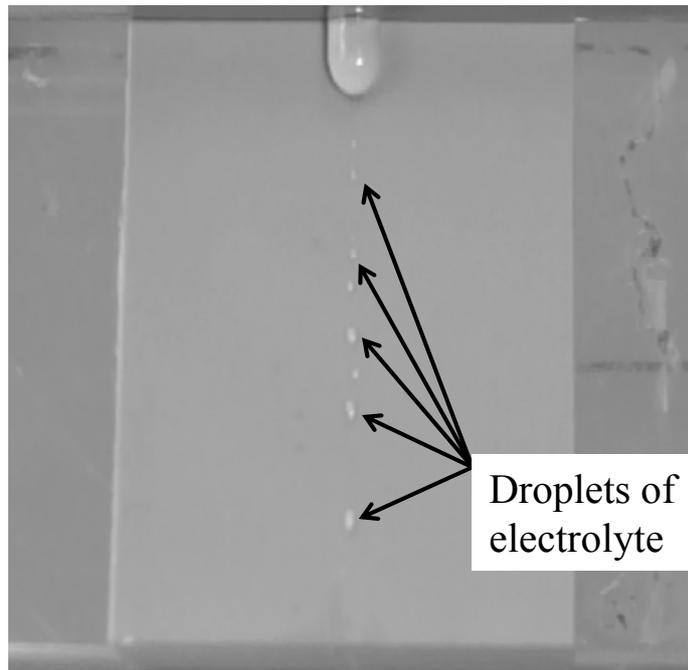


図 5.34 試料表面に水滴が付着した様子

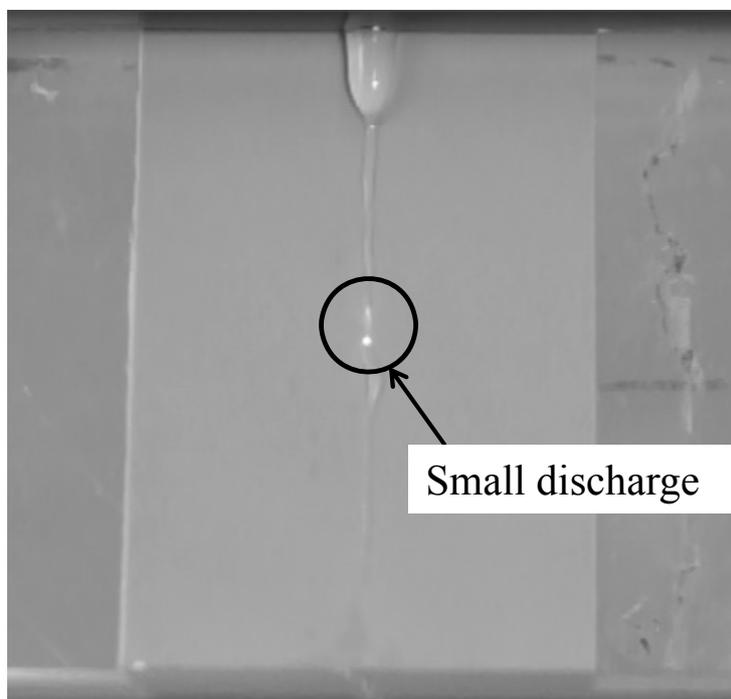


図 5.35 微小放電発生時の試料表面の様子

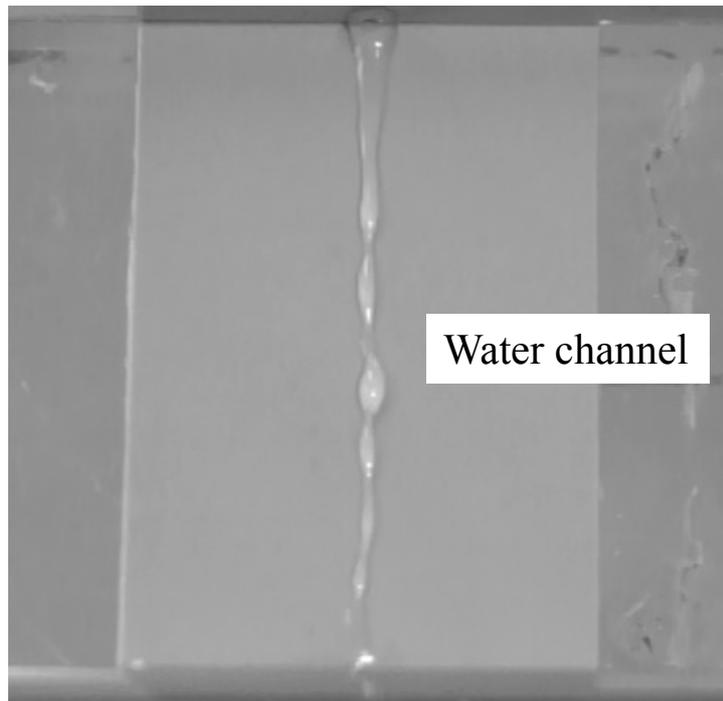
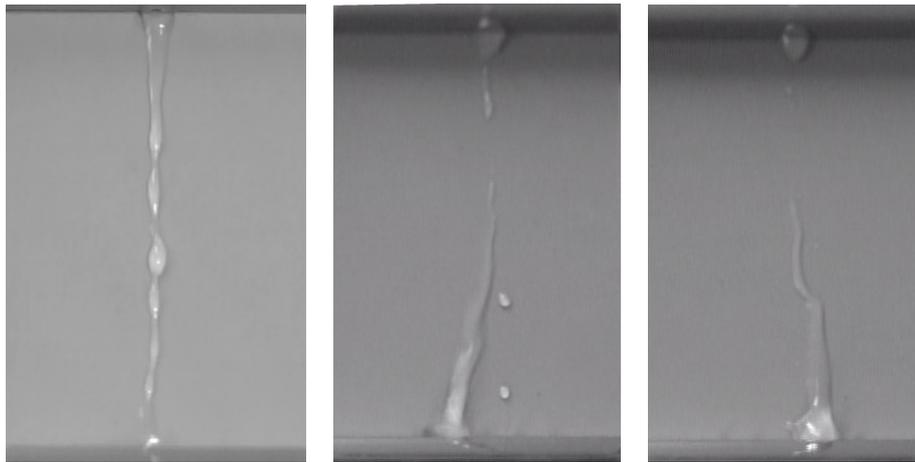


図 5.36 持続放電開始直後の試料表面の様子

5.3.1.3 試験方法

DDT の試験では、本来、交流課電が想定されており、直流課電下でのポリマー材料の評価は行われていない。本節では、DDT 試験において、交流課電と直流課電下における試料の撥水性へ及ぼす影響について検討を行った。なお、CIGRE の提案する試験電圧 4 kV を試料間に印加すると、交流課電の場合には図 5.37 (a)のように電解液滴下経路は中央付近となるが、直流課電の場合には同図(b)や(c)に示すように、試料表面の帯電の影響を強く受け試料上の電解液滴下経路が左右に変化した。すなわち、試験中の滴下経路が一樣にならなかった。そこで、目視による確認で、滴下経路がほとんど一樣となる電圧の 3 kV に設定することとした。なお、印加電圧を 3 kV とした場合、交流課電においては試験時間が 24 時間を越えてしまい、DDT の試験条件を満たさないばかりか試験が長時間に及ぶことが判明した。そこで、電解液の導電率、電解液の滴下数をそれぞれ変化させて、試験時間を 24 時間以内としたうえで、交・直流課電の違いによるポリマー材料の電気的特性を検討した。試験には液状シリコーンゴムを用いた。試料の保存及び試験時の室温は 21 ± 3 °C とし、湿度は 40 ~ 70 % に設定した。イオン交換水に塩化ナトリウム (NaCl) を溶かして導電率を一定に設定した電解液を、ポンプにより上部電極中央部に設けた注水孔を通して一定の滴下頻度で試料表面に連続滴下するとともに、電極間に電圧を印加した。図 5.38 に電極と試料の構成を、表 5.3 に試験条件をそれぞれ示す。CIGRE の提案によると、電圧印加後 2 ± 0.5 mA 以上の漏れ電流が 4 ± 0.5 秒間継続して流れるまでの時間を撥水性消失時間と定義しており⁽²³⁾、これを試験終了の条件とした。



(a) 中央 (b) 左側 (c) 右側

図 5.37 直流課電時の電解液の滴下経路の変化

表 5.3 DDT 試験条件

Applied voltage	+3 kV, 3 kVrms
Test liquid	Deionized or distilled water with NaCl
Conductivity [mS/cm]	0.1, 1, 4, 8, 12, 16
Drop rate [drops/min]	12, 24, 36, 48, 60
Temperature of test liquid [deg C]	21±3

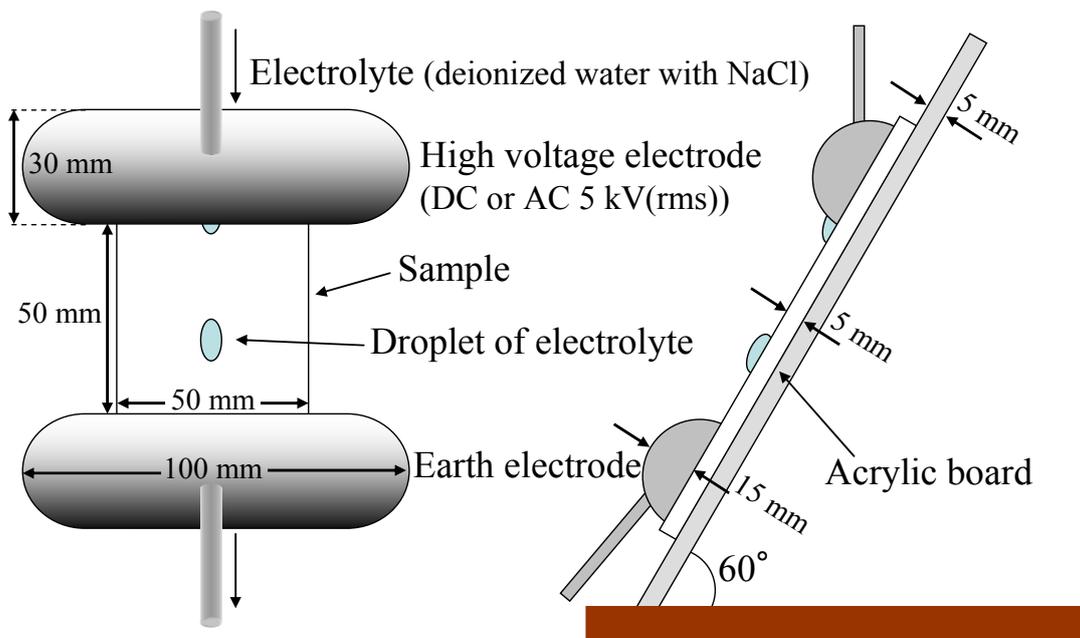


図 5.38 電極と試料の構成

5.3.2 試験結果

5.3.2.1 導電率の影響

直流正極性 3 kV 課電時において、導電率を変化させた際の撥水性消失時間の変化を図 5.39 に示す。滴下数は標準の 12 drops/min とした。0.1 mS/cm では撥水性消失時間が 1200 min とその他の導電率と比較して著しく長くなっている。1~16 mS/cm では撥水性消失時間は平均値で 140~280 min 程度となり 1 mS/cm 以降はほとんど一定となった。また、導電率が上がるにつればらつきが小さくなっていることが分かる。電解液を滴下することで撥水性が消失する要因の一つとして電解液中に含まれる NaCl の影響が考えられる。導電率が高くなるにつれて電解液中に含まれる NaCl の量は多くなるため、滴下の際に NaCl が試料表面に付着しやすくなる。親水性である NaCl が試料表面に付着することで試料表面に水滴が残り、一時的に撥水性が消失している状態になり、最終的に上部電極と下部電極を橋絡するような水路が形成されてしまうことが考えられる。そのため、1~16 mS/cm では導電率が上昇するにつれ撥水性消失時間がわずかに短くなったものと考えられる。一方、交流 3 kVrms 課電時には導電率の最も高い 16 mS/cm においても 24 時間以内に撥水性が消失し放電することはなかった。そのため、変化させた導電率の範囲で 24 時間以内に放電の発生した交流 6 kVrms 課電時の結果を図 5.40 に示す。図 5.39 と図 5.40 を比較すると、印加した電圧は異なるが、直流課電時においても交流課電時と同様に 0.1 mS/cm の場合に著しく撥水性消失時間が長くなっていることが分かる。

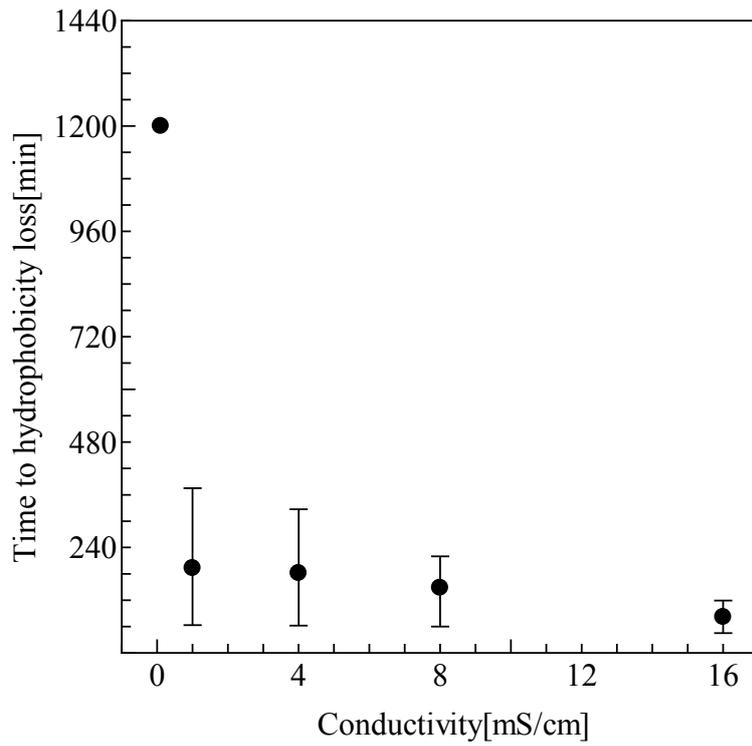


図 5.39 直流正極性 3 kV 課電時に各導電率を変化させた場合の撥水性消失時間

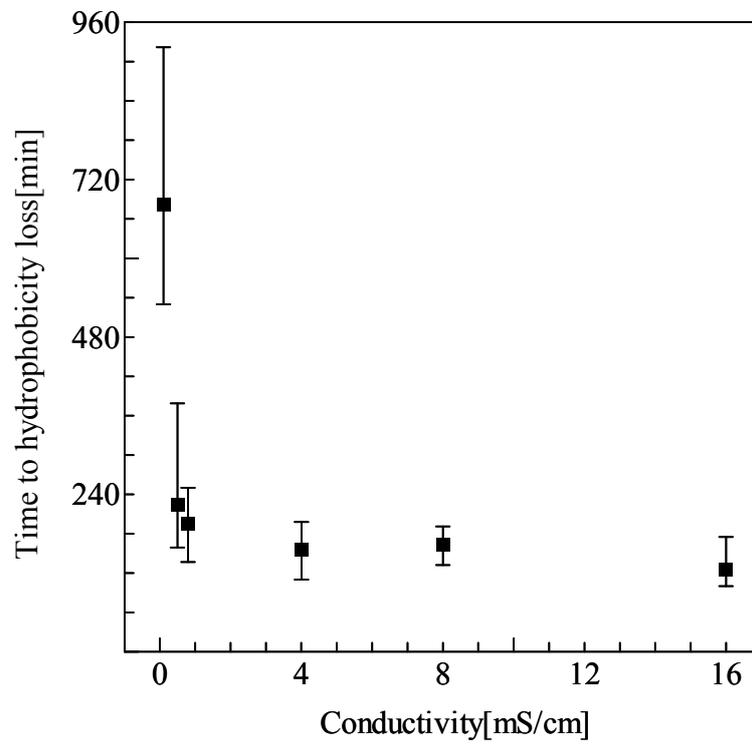


図 5.40 交流 6 kVrms 課電時に各導電率を変化させた場合の撥水性消失時間

5.3.2.2 滴下数の影響

これまでの結果から、印加電圧が 3 kV の場合、交流課電時には試験時間が長くなることが考えられたため、導電率を試験範囲の中で最も高い 16 mS/cm とした。図 5.41 と図 5.42 に直流課電時と交流課電時の滴下数変化時の撥水性消失時間をそれぞれ示す。図 5.41 から、直流課電時に滴下数を増加させると、12 drops/min と比較して 24 drops/min 以上のいずれの滴下数においても早い時間で撥水性が消失する結果となった。特に、60 drops/min においては、滴下直後から数十秒の間で放電が確認された。また、図 5.42 から、交流課電試験においては、16 mS/cm、12 drops/min の条件下では 27 時間まで観測したが放電の発生には至らなかった。しかし、滴下数 24 drops/min では 24 時間以内に放電に至り、滴下数を増加させていくにつれて撥水性消失時間が短くなっていることが分かる。

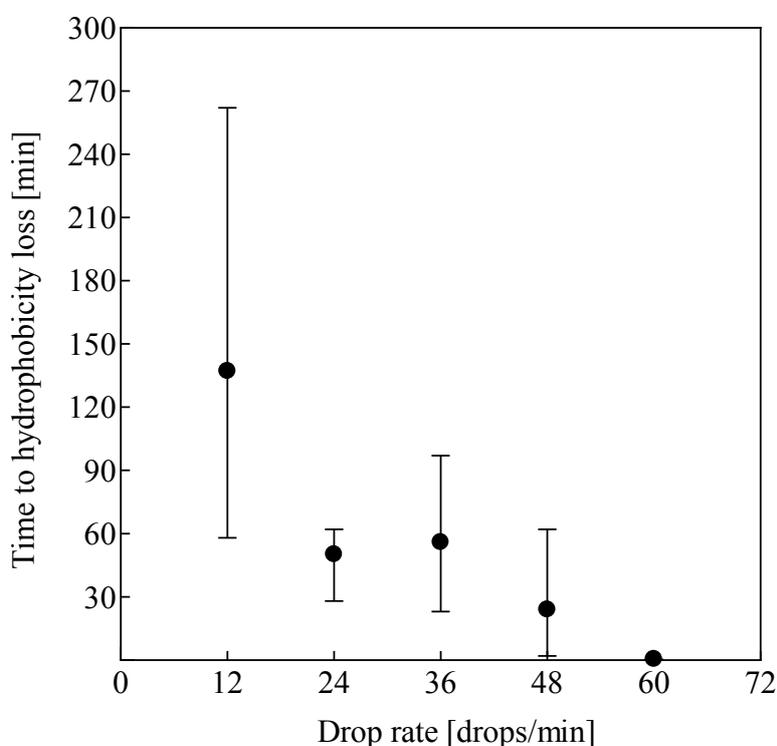


図 5.41 直流正極性課電時に滴下数を変化させた場合の試験結果

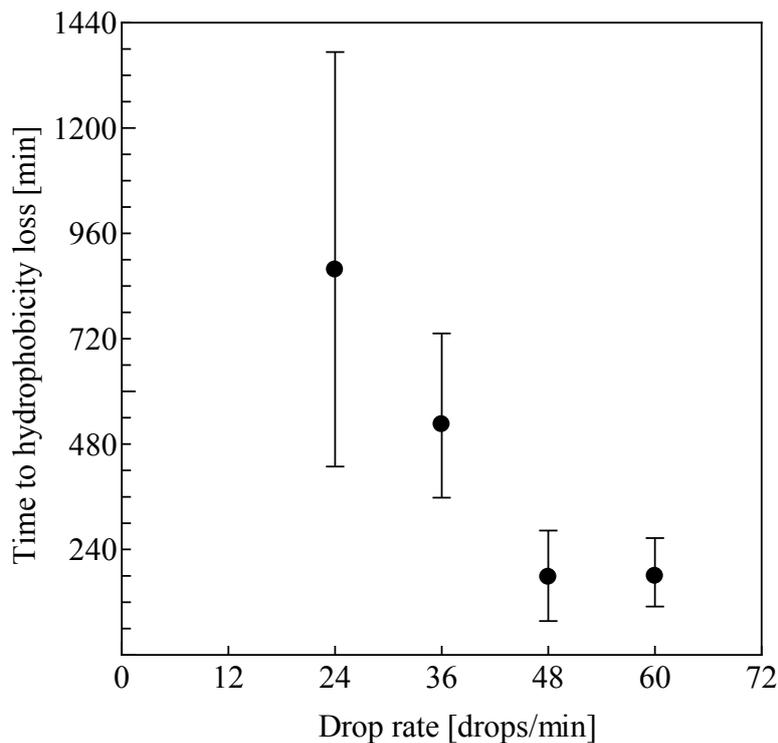


図 5.42 交流課電時に滴下数を変化させた場合の試験結果

5.3.2.3 撥水性消失の要因

表 5.4 に電圧印加後の滴下数の変化を示す。電圧を印加すると交流課電，直流課電のどちらの場合でも滴下数は電界の影響を受けて増加する。直流課電では高電界であるため，電圧印加後の滴下数は交流課電に比べ顕著であり，滴下数に対する影響がより大きくなったと考えられる。また，60 drops/min の場合では滴下数が増加したことで表面の撥水性に関係なく，滴下する電解液で導通したため開始から数十秒の間で放電に至ったものである。

表 5.4 電圧印加後の滴下数の変化

電圧印加前滴下数 [drops/min]	電圧印加後滴下数[drops/min]	
	AC	DC+
12	13	16
24	26	29
36	38	43
48	51	56
60	64	70

次に、DDTにおける試料表面の帯電量の変化を非接触型表面電位計により測定した。測定は非課電時、交流課電時、直流課電時のそれぞれで行った。電解液の導電率は表 5.2 に示す 1.5 ± 0.2 mS/cm とした。測定箇所は課電側電極から約 10 mm の位置とし、滴下の間隔を 30 秒程度あけ 100 滴滴下後まで滴下毎に測定を行った。表面電位の時間変化を図 5.43 に示す。同図から、非課電時(a)では水滴の滴下によって試料表面の電位はほとんど変化していないが、交流課電時の(b)及び(c)では、電荷を帯びた水滴が滴下することによって試料表面の電位が正負に大きく変動していることが分かる。ここで、水滴の滴下によって表面電位が正負に変動するのは、交流課電していることで課電側電極を離れる瞬間の水滴の帯電量及び極性が滴下の度に異なるためである。また、変動の幅は印加電圧が大きい(c)の方が大きくなっている。一方、直流課電時(d)では、1 滴目の水滴が滴下することによって試料表面が急激に帯電し、2 滴目以降その値にほとんど変化は見られなかった。また、交流課電時に比べて比較的大きな値を示していることが分かる。これらの結果から、以下のようなことが考えられる。DDT では、シリコーンゴム表面は常に帯電状態にある。すなわち、表面エネルギーが高い状態にあるために定常的に撥水性が低い状態となる⁽²¹⁾⁽²³⁾。また、常に帯電状態にあることによって、シリコーンゴム表面のメチル基が一定方向へ配向し、反転分布となることによって撥水性の低下が生じると考えられている⁽²⁴⁾。ここで、直流課電時の方が交流課電時に比べて試料表面は大きく帯電していたことから、直流電源を用いて DDT を行った場合、帯電による試料表面の撥水性への影響はさらに大きくなるものと考えられる。

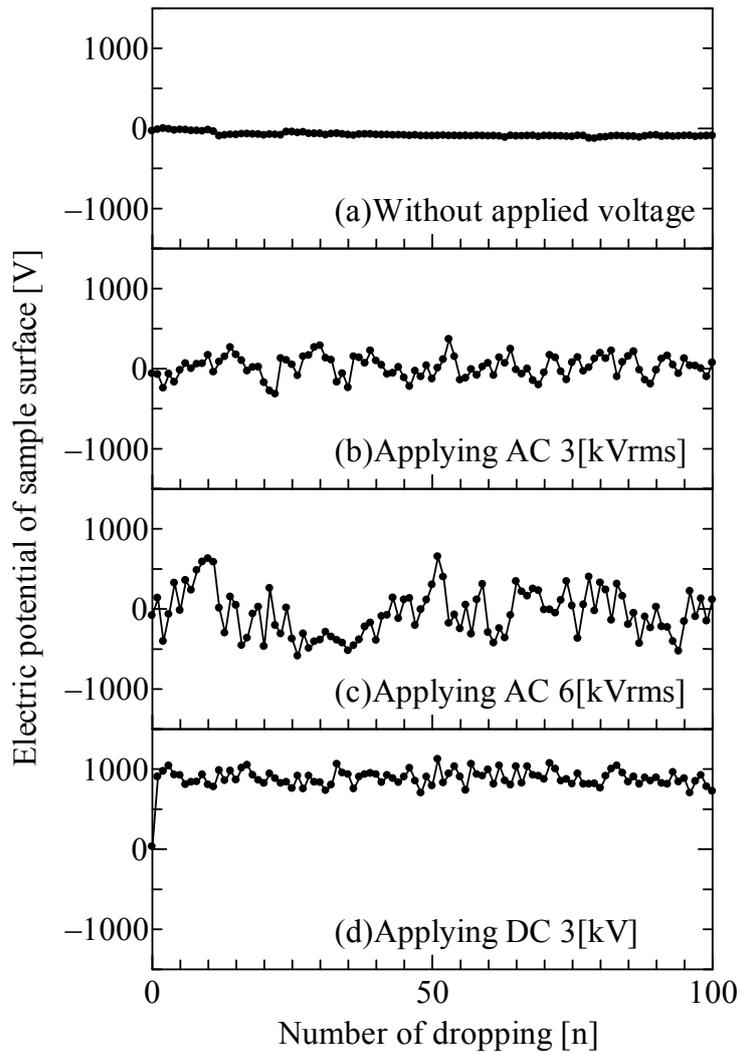


図 5.43 水滴滴下による試料の表面電位の変化

5.4 複合汚損試験

5.4.1 複合汚損試験方法

複合汚損試験は 5.2 節で述べた塩霧試験に適用する試料に実際の使用環境を模擬した不溶性の汚損物質で汚損を施して実施したものである。表 5.5 に試験条件を示す。課電回路や噴霧条件等は 5.2 節の塩霧試験と同様である。複合汚損試験では、不溶性の汚損物質として大気中の塵埃を模擬したとの粉と、金属汚損物質を模擬した 3 種類の金属粉（鉄粉、銅粉、カーボン粉末）を用いた。試料表面の汚損物質の指標として不溶性物質付着密度（non-soluble deposit density: NSDD）を適用した。鉄粉と銅粉は実環境を模擬するために予め錆を生じさせた。試料には液状シリコーンゴム（LSR）を用い、NSDD が 1 mg/cm^2 となるように各汚損物質を表面に付着させた。との粉は、蒸留水に混ぜた混濁液を試料表面に流し込み、水分を蒸発させて汚損を施した。また、金属粉はコンプレッサーにより吹き付けることで汚損させた。図 5.44 に汚損前の試料及び各汚損物質による汚損後の試料表面の状態を示す。なお、図 5.44(f)は、銅粉

とカーボン粉による混合汚損である。

表 5.5 複合汚損試験条件

Test time [h]	24
Applied voltage	3kVrms, ± 3 kV
Smoothing capacitor [μ F]	50
Series resistor [k Ω]	100
Detection resistor [Ω]	100
Sample size [mm \times mm \times mm]	50 \times 70 \times 5
Gap length [mm]	50
Chamber size [m \times m \times m]	1 \times 1 \times 1
Spray rate [ℓ /hour]	0.6
Conductivity [mS/cm]	4
NSDD [mg/cm ²]	1



(a) 新品



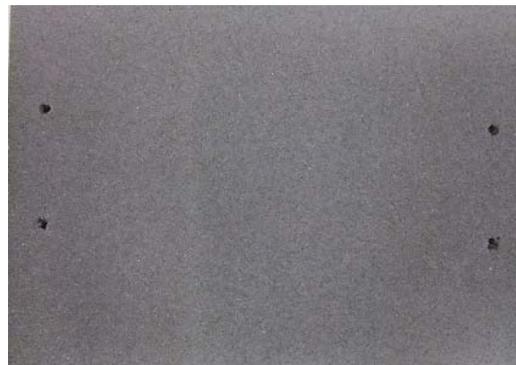
(b) との粉汚損



(c) 鉄粉汚損



(d) 銅粉汚損



(e) カーボン汚損



(f) 銅粉・カーボン混合汚損

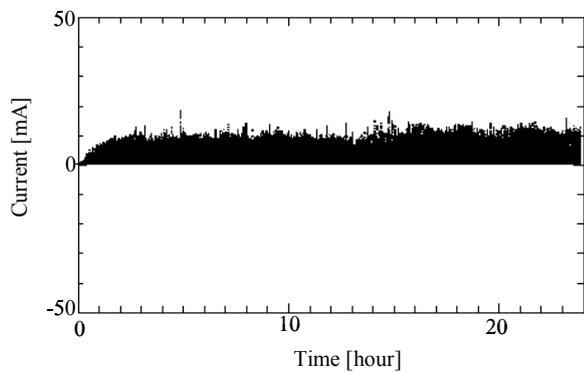
図 5.44 試料の汚損状態

5.4.2 試験結果

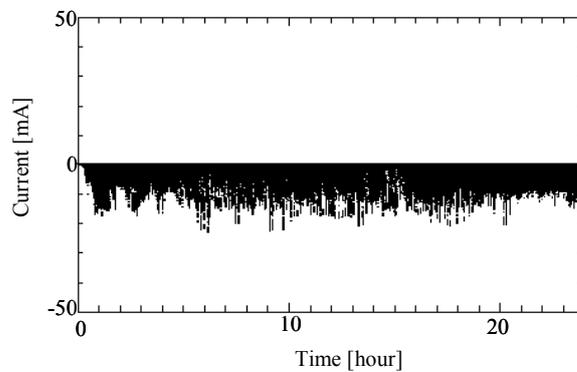
5.4.2.1 との粉汚損

図 5.45 及び図 5.46 に、汚損物質にとの粉を用いた場合の漏れ電流波高値の経時変化と試験終了後の試料の状態をそれぞれ示す。図 5.45 から明らかなように、どの試験条件においても試験開始直後から漏れ電流が確認できる。試験を通して、交流の場合で 5 mA から 15 mA, 直流正極性で 10 mA から 15 mA, 直流負極性の場合に 8 mA から 22 mA の漏れ電流波高値が得られた。ところで、印加電圧が直流正極性の場合には比較的安定した波高値となっているが、交流と直流負極性の場合では試験中に漏れ電流波高

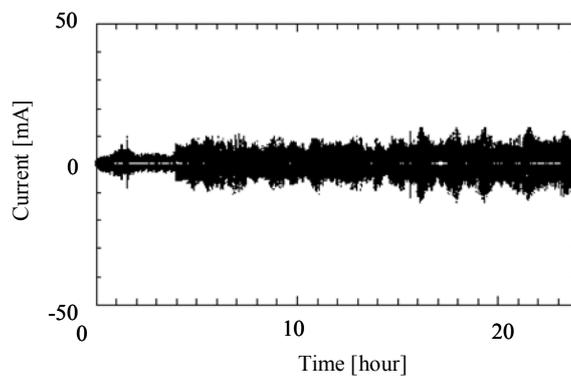
値が増減している。また、図 5.46 において、交流、直流正極性では接地側に、直流負極性では課電側に放電の痕跡が見られる。さらに、直流においては、陰極側に激しいエロージョンを確認することができる。なお、放電痕やエロージョン周辺においては汚損物質がほとんど消失している。



(a) 直流正極性



(b) 直流負極性



(c) 交流

図 5.45 波高値の経時変化 (との粉)

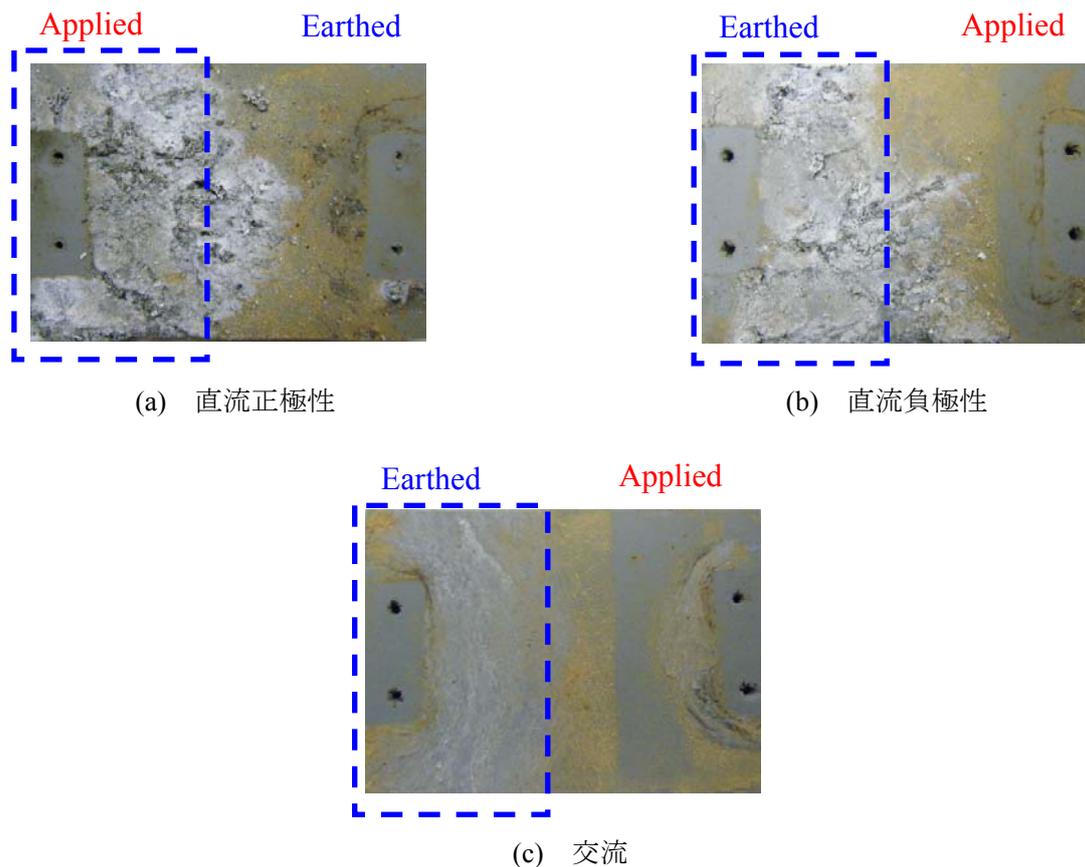
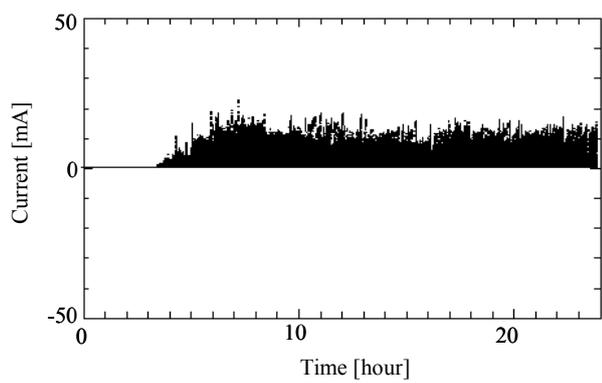


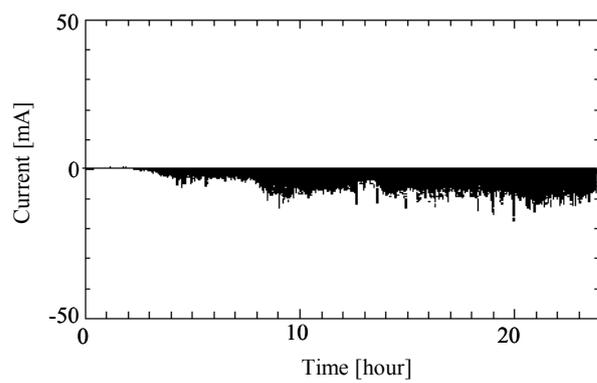
図 5.46 との粉を用いた複合汚損試験終了直後の試料

5.4.2.2 鉄粉汚損

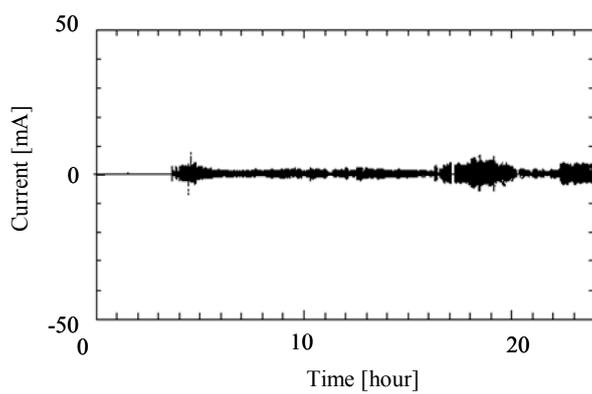
図 5.47 及び図 5.48 に、汚損物質に鉄粉を用いた場合の漏れ電流波高値の経時変化と試験終了後の試料の状態をそれぞれ示す。図 5.47 において、試験開始から漏れ電流が検出されるまでには 2 時間から 4 時間程度経過していることが分かる。試験中の漏れ電流波高値は、交流では 3 mA から 7 mA，直流正極性では 10 mA から 20 mA，直流負極性では 5 mA から 15 mA 程度が得られたことが分かる。また，図 5.48 から，交流，直流正極性では接地側に放電の痕跡が見られ，直流負極性では課電側だけでなくエロージョンが広い範囲で接地側電極付近においても確認できる。また，直流課電ではエロージョンの進展に伴って汚損物質が消失しているが，交流では比較的多くの汚損物質が残存している。



(a) 直流正極性



(b) 直流負極性



(c) 交流

図 5.45 波高値の経時変化 (鉄粉)

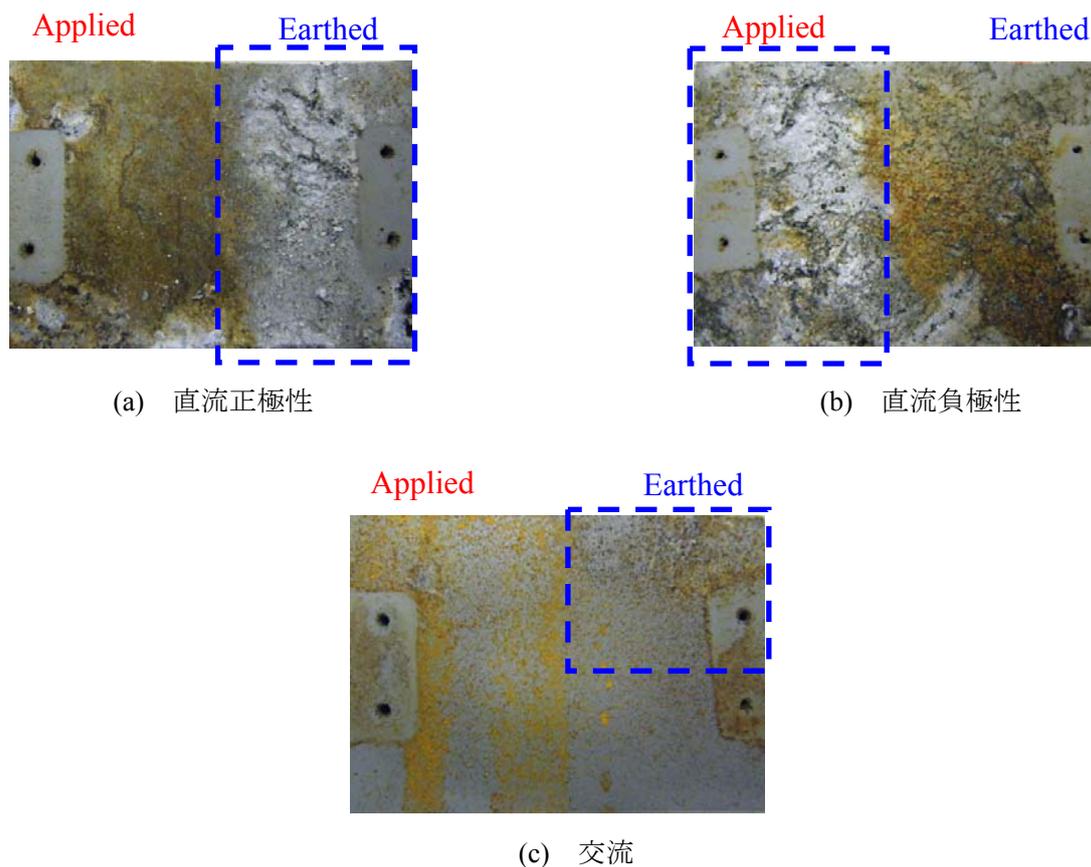
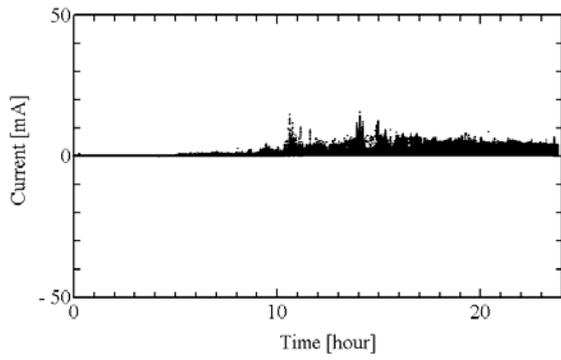


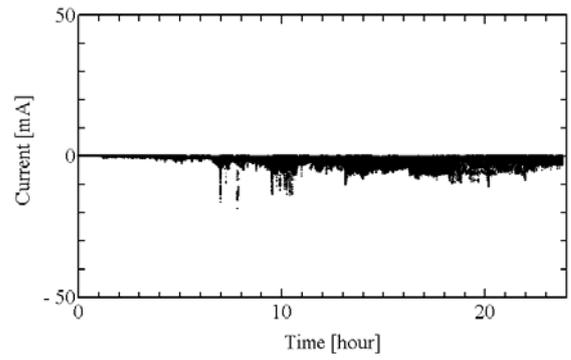
図 5.48 鉄粉を用いた複合汚損試験終了直後の試料

5.4.2.3 銅粉汚損

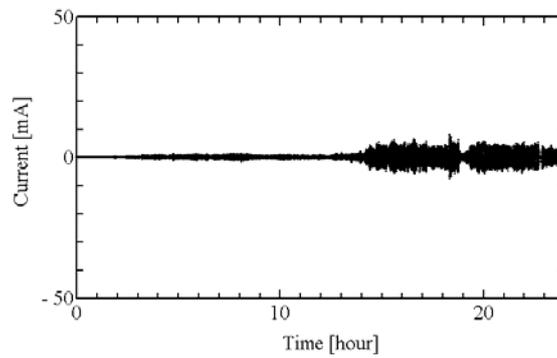
図 5.49 及び図 5.50 に、汚損物質に銅粉を用いた場合の漏れ電流波高値の経時変化と試験終了後の試料の状態をそれぞれ示す。図 5.49 において、試験開始から漏れ電流が検出されるまでには 2 時間から 3 時間程度経過していることが分かる。試験中の漏れ電流波高値は、交流では 5 mA から 10 mA、直流正極性では 5 mA から 15 mA、直流負極性では 10 mA 程度が得られた。また、図 5.50 から、交流、直流正極性では接地側に放電の痕跡が見られ、直流負極性では課電側でエロージョンが確認できる。直流正極性では接地側だけでなく広い範囲でエロージョンが確認できる。また、放電やエロージョンの発生箇所では汚損物質の消失が確認された。



(a) 直流正極性



(b) 直流負極性



(c) 交流

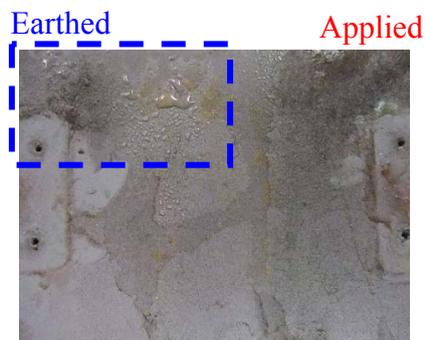
図 5.49 波高値の経時変化 (銅粉)



(a) 直流正極性



(b) 直流負極性



(c) 交流

図 5.50 銅粉を用いた複合汚損試験終了直後の試料

5.4.2.4 カーボン汚損

図 5.51 及び図 5.52 に、汚損物質に鉄粉を用いた場合の漏れ電流波高値の経時変化と試験終了後の試料の状態をそれぞれ示す。図 5.51 において、試験開始から漏れ電流が検出されるまでには1時間から5時間程度経過していることが分かる。試験中の漏れ電流波高値は、交流では3 mA から10 mA、直流正極性では5 mA から15 mA 程度、直流負極性では10 mA から20 mA 程度が得られた。また、図 5.52 において、交流、直流正極性では接地側に放電の痕跡が見られ、直流負極性では課電側だけでなくエロージョンが試料中央付近まで確認できる。また、放電の発生箇所では汚損物質の消失が確認された。

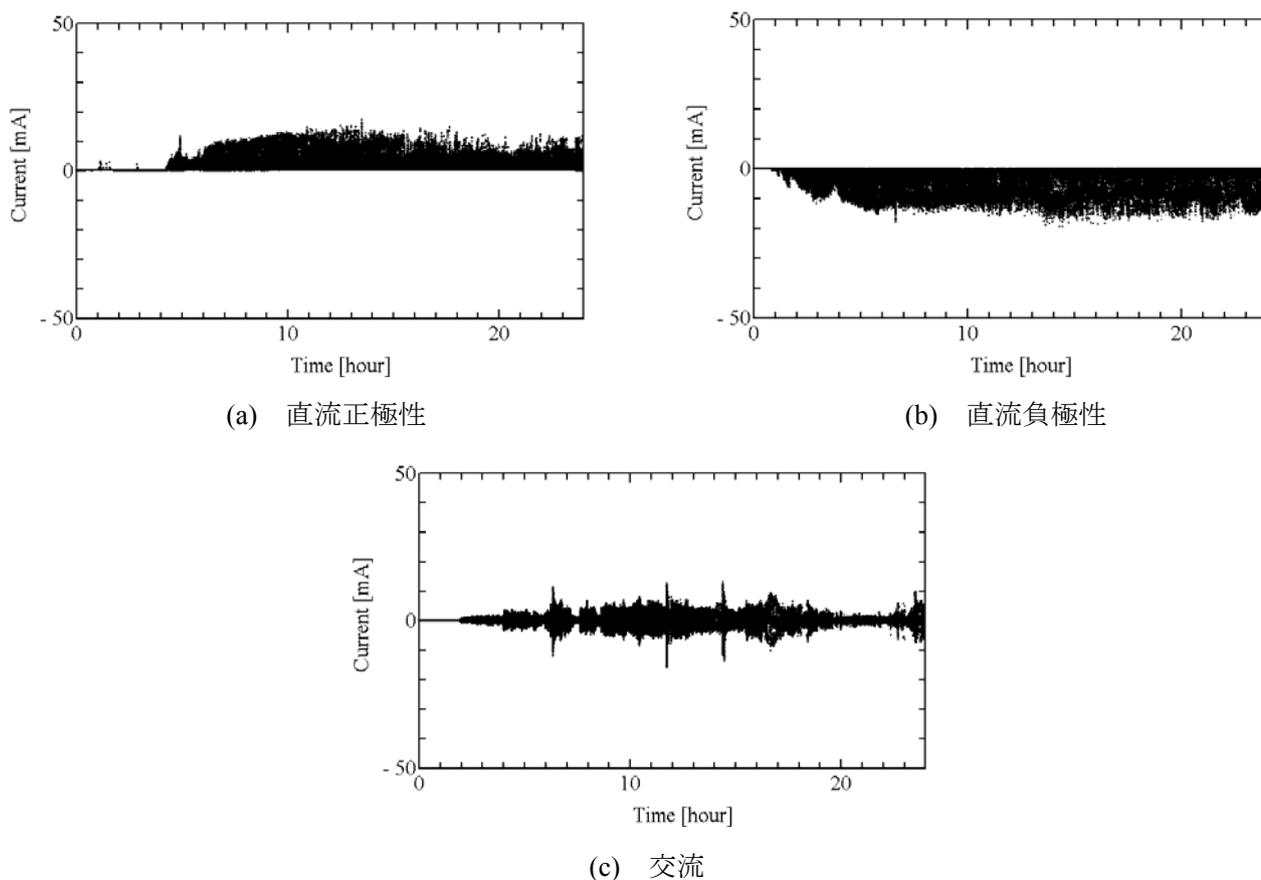


図 5.51 波高値の経時変化（カーボン粉末）

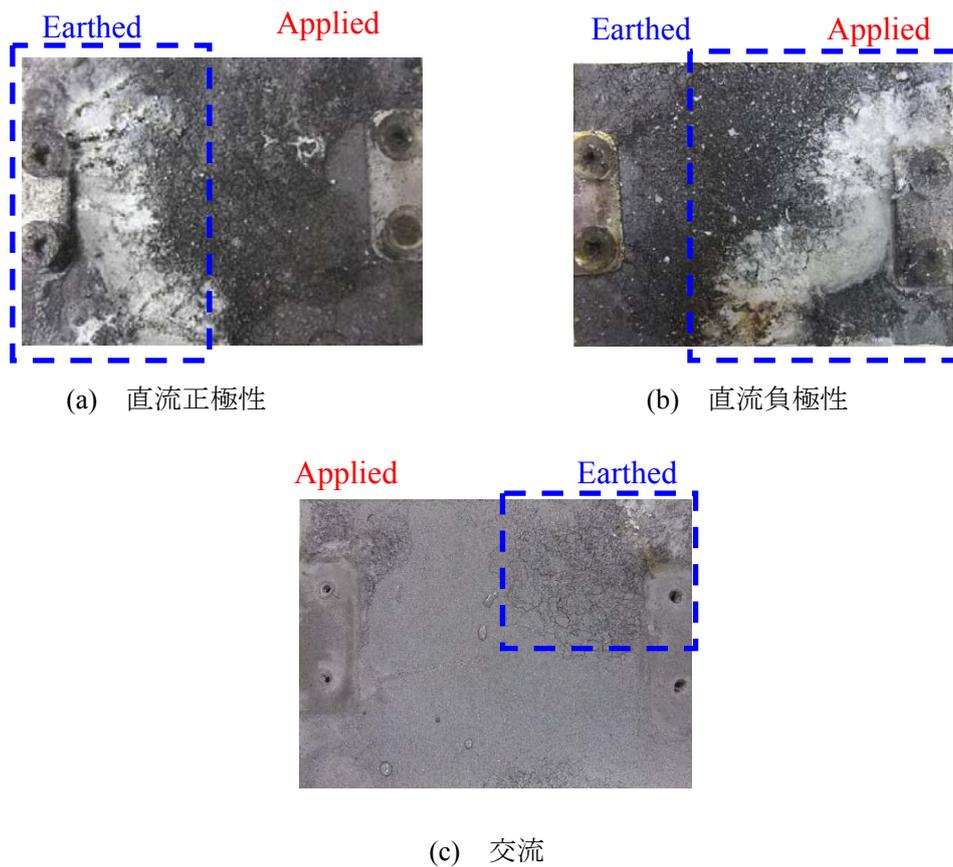
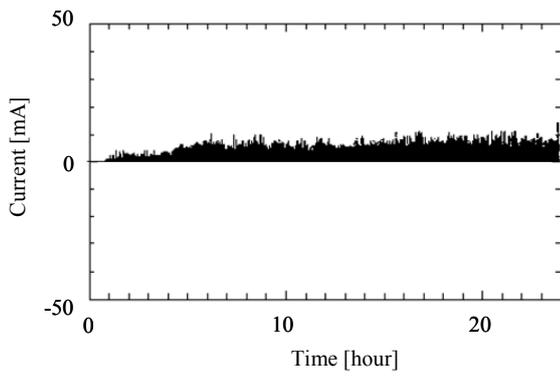


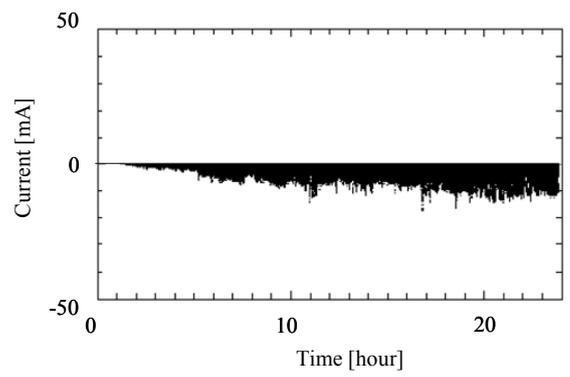
図 5.52 カーボン粉末を用いた複合汚損試験終了直後の試料

5.4.2.5 混合汚損

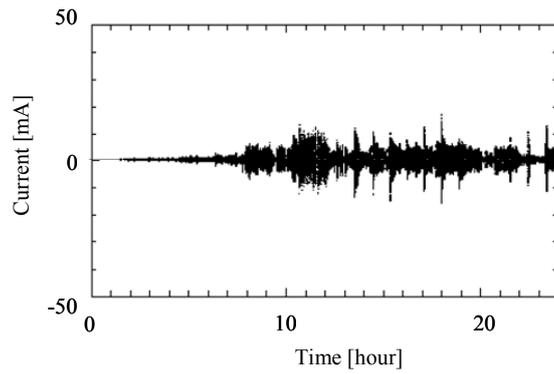
図 5.53 及び図 5.54 に、銅粉とカーボン粉末の混合汚損を施した場合の漏れ電流波高値の経時変化と試験終了後の試料の状態をそれぞれ示す。図 5.53 において、試験開始から漏れ電流が検出されるまでに 1 時間から 2 時間程度経過しているが、これは鉄粉の場合より短時間であることが分かる。試験中の漏れ電流波高値は、交流では 2 mA から 15 mA、直流では正極性、負極性ともに 5 mA から 15 mA 程度が得られた。図 5.54 においては、銅粉、カーボン粉末による混合汚損の場合でも他の場合と同様に交流、直流正極性では接地側に、直流負極性では課電側に放電の痕跡が見られる。直流では激しいエロージョンが見られ、特に負極性課電では、鉄粉の場合と同様に広い範囲にエロージョン痕が見られる。さらに、放電やエロージョンの発生箇所では汚損物質の消失が確認された。



(a) 直流正極性

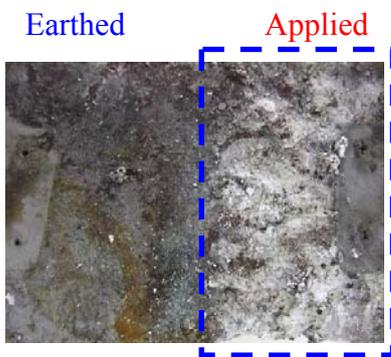


(b) 直流負極性



(c) 交流

図 5.53 波高値の経時変化（混合汚損）



(a) 直流正極性



(b) 直流負極性



(c) 交流

図 5.54 混合汚損の場合の複合汚損試験終了直後の試料

5.4.2.6 各種電圧による累積電気量及び表面状態の比較と検討

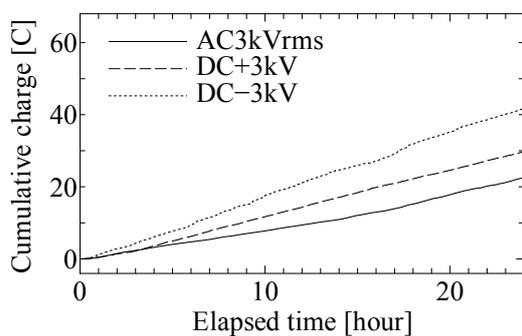
5.4.2.1 から 5.4.2.5 で述べたように、交流の場合は主に接地側に放電痕が確認された。また、金属汚損に比べ、との粉による汚損の方が放電痕を広範囲で確認できた。さらに、直流の正極性の場合には接地側、負極性の場合では課電側と、汚損物質によらず陰極側に顕著なエロージョンが確認できた。また、放電痕やエロージョンの確認できる箇所では汚損物質の消失が確認できた。漏れ電流の発生時間は、どの印加電圧源においてもとの粉では試験開始直後であるのに対して、金属汚損では漏れ電流が検出されるまでには数時間程度経過した後であった。また、カーボン粉末による汚損や銅粉とカーボン粉末の混合汚損が鉄粉汚損や銅粉汚損よりも放電が開始するまでの時間が短かった。これらは、試料表面の状態が、との粉の場合はほぼ同様であるのに対して金属汚損の場合には若干不均一であったことが原因として考えられる。この表面状態の違いは、汚損物質により密度や粒径が異なるためである。汚損の指標が NSDD であることから、単位面積あたりに存在する汚損物質の粒子数がとの粉に比べ、金属の場合に少なくなることや、との粉と金属での汚損の施し方の違いによるものである。

図 5.55 に、複合汚損試験中の電気量の時間変化を、図 5.56 に複合汚損試験の累積電気量をそれぞれ示す。図 5.55 において、どの汚損物質の場合にも試験開始から数時間は印加電圧源の種類によらず電気量の増加傾向は同程度である。しかし、時間が経過すると直流の場合で増加の程度が大きくなり、最終的な電気量は交流に比べて直流の方が多くなる。汚損物質が鉄粉の場合では直流の極性による違いはあまり見られなかったが、それ以外では負極性の場合に電気量が多くなっている。また、汚損物質がとの粉である場合に比べ、銅粉とカーボンの混合汚損の場合に電気量の差は大きくなっている。

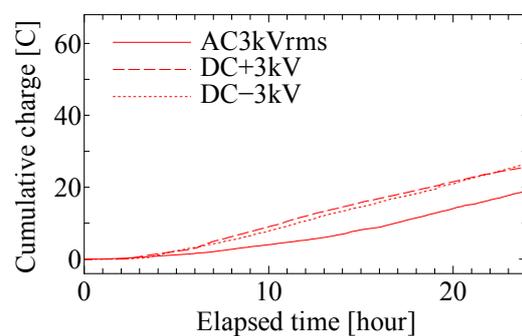
また、図 5.56 において、との粉と鉄粉汚損、銅粉汚損、カーボン汚損の結果を比較すると、それぞれの印加条件において、との粉汚損時の放電電気量がそれ以外の場合よりも大きいことが分かる。これは、汚損物質の持つ吸湿性の違いに依存している。との粉は金属に比べ水分を吸着し易いため試料表面の湿潤が早く、早い時間から導電性電流が流れると考えられる。また、汚損物質の密度も影響している。図 5.44 で示したように、粒径が小さく粒子密度の高いとの粉は試料表面を一様に汚損できるが、試料表面の汚損物質の密度が低い金属粉では、汚損物質だけでなく LSR を確認することができる。このことから、金属汚損では噴霧による試料表面の湿潤が一様にならず、との粉に比べ導電性電流が流れにくかったと考えられる。カーボン汚損や銅粉とカーボンの混合汚損では、カーボンが導電性材料であるために、表面が一様に湿潤しない場合でもカーボンと水分によって導電路が形成される。そのため、鉄粉や銅粉による汚損に比べて電気量が大きくなったと考えられる。

ところで、交流課電に比べて直流課電の場合は、との粉と金属汚損時の電気量の差が小さい。交流では電圧零点により放電が途切れるため、放電の持続は長くても 8.3 ms 以内であるのに対し、直流では一

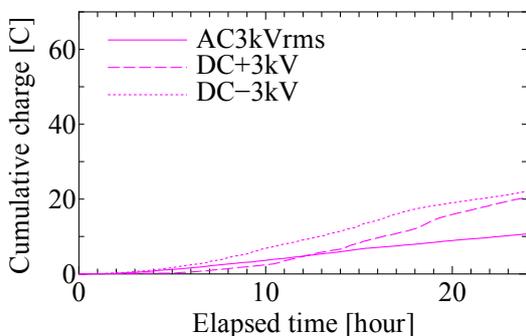
一旦放電が発生すると放電路が長くなることで放電を維持することができず消失するまで、長い場合には放電が 10 ~ 20 ms 間持続する。そのため、汚損物の影響が交流の場合に比べると小さくなる。また、直流においては、銅粉とカーボンによる混合汚損の累積電気量が最も大きくなったが、交流においてはとの粉による汚損の方が大きくなった。との粉では導電性電流が流れやすく、且つ導電性電流が流れることによって形成される乾燥帯においてドライバンドアーク放電が発生する。一方、金属汚損の場合、試料表面の湿潤が一樣でないことから、汚損物質間は小さな放電ギャップとして作用する。前述したように、交流課電では電圧零点で一旦放電は途切れるので、金属汚損の場合の電気量は小さくなる。直流課電下では放電が継続して発生するので、との粉汚損時よりも金属汚損時の電気量が大きくなる。



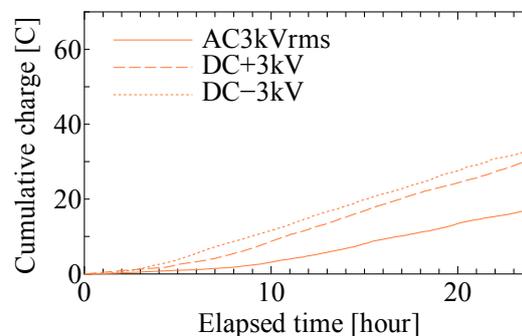
(a) との粉汚損



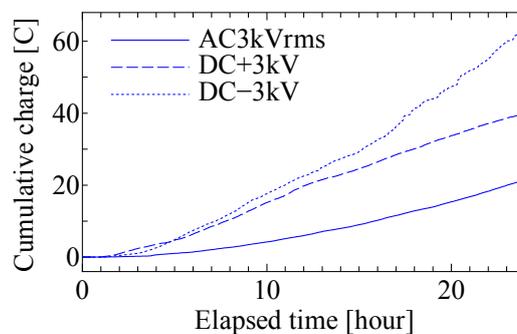
(b) 鉄粉汚損



(c) 銅粉汚損



(d) カーボン汚損



(e) 混合汚損

図 5.55 複合汚損試験結果

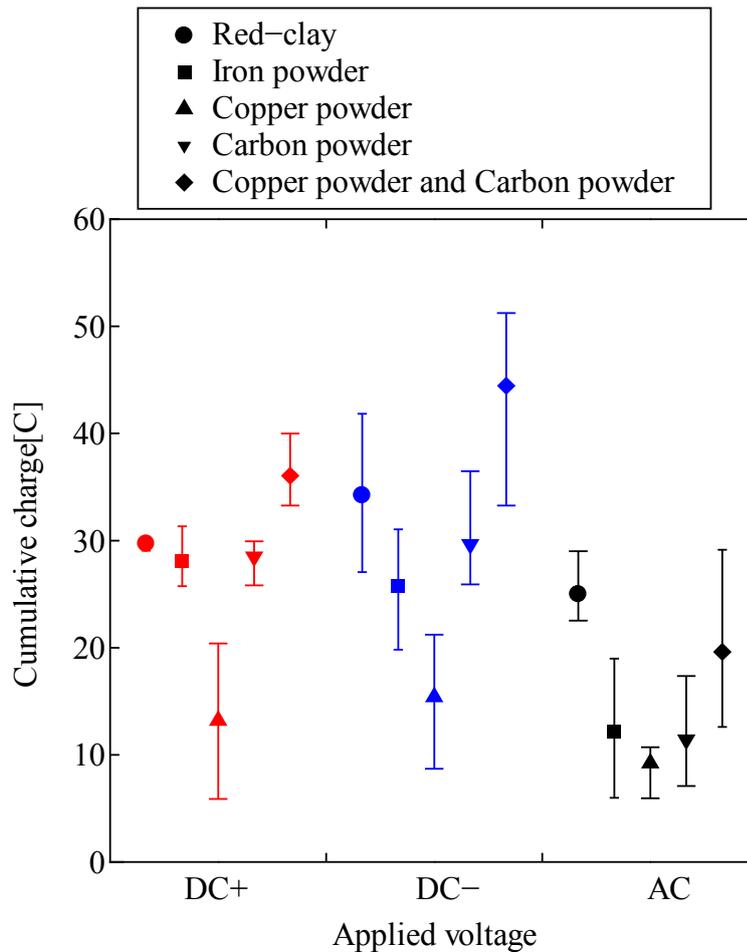


図 5.56 累積電気量

5.5 まとめ

SiR 試料と LSR 試料を用いて直流課電及び交流課電で塩霧試験を行い、放電による試料への影響に関する検討を行い、試験後の試料の撥水性の評価を STRI 法により行った。さらに、LSR 試料では撥水性消失特性の評価を Dynamic Drop Test により行い、実環境により近い複合汚損試験を行った。その結果として、以下のような結果が得られた。

塩霧試験では、直流課電によるほとんどの試験において、陰極側で激しい放電が発生し、その周辺の試料上に激しいエロージョンが発生した。試料の撥水性については、試験後、回復時間をおくことによってある程度の回復がみられたが、どの条件下でも 24 時間では試料が有する初期の撥水性クラス (HC1) までの回復はみられなかった。また、撥水性の回復について試料毎に比較すると、SiR 試料より LSR 試料の方が全体的に良好であった。課電条件毎の累積漏れ電流電気量及び放電による試料の損耗量については、交流課電時には電気量、損耗量ともに結果のばらつきは小さかったが、直流課電時では大きくばらつく結果となった。また、直流課電時における累積漏れ電流電気量の最終値の平均は、概算で交流課電時の約 2 倍程度であったのに対し、損耗量については、直流放電による損耗量は交流放電によるもの

より 10 倍以上大きな値となっていたことから、交流放電に比べて、直流放電が試料に与える影響は非常に大きいことが示された。

次に、Dynamic Drop Test では、直流及び交流課電が LSR 試料の撥水性に及ぼす影響について検討し、電解液の導電率、滴下数を変化させることで比較を行った。その結果、交流課電、直流課電共に、電解液の導電率、滴下数の増加に伴い撥水性消失時間が短くなった。また、直流課電は交流課電に比べ撥水性消失時間が短くなった。これは、直流課電時では交流課電時に比べ、電圧印加後の滴下数が多くなるためである。滴下数が多くなることで、電解液に含まれる塩化ナトリウムが試料表面に付着する機会が増えることや、試料表面の帯電状態が維持されやすくなることが原因として挙げられる。

複合汚損試験では、実環境における不溶性物質の汚損をとの粉で、さらに金属異物による汚損を鉄粉、銅粉、カーボンで模擬し、各汚損状態が漏れ電流に与える影響を評価した。その結果、汚損物質の密度や吸湿性等の違いから、漏れ電流が発生するまでの時間に差が見られた。また、試験後の試料では、汚損物質によらず、交流では接地側で、直流では負極側で主に放電痕が確認された。さらに、交流に比べて直流課電下では、汚損物質が電気量へ与える影響が大きくなることが分かった。

第6章 結言

6.1 本論文の要約

屋外用電気絶縁機器の外被材としてポリマー材料の適用のための検討が進められる中、本研究では、ポリマー材料の長期信頼性を明らかにするために以下の実験を行った。

- (1) 環境の異なる試験場でポリマー碍子の曝露試験を実施し、得られた電気量の比較、曝露後の材料の表面撥水性の評価
- (2) 汚損湿潤試験及び複合汚損試験により、材料の表面汚損物質が導電性電流、ドライバンドアーク放電の発生及び累積電気量に与える影響の検討
- (3) 長期間実線路で使用されたポリマー碍子撤去品の塩霧試験及び外被材料の組成分析、撥水性評価によるポリマー材料の劣化の有無と耐汚損性能との関係の検討
- (4) 直流課電と交流課電での塩霧試験及び複合汚損試験による放電特性への影響の検討、異なる汚損物質による累積電気量の違い、直・交流電圧による影響の検討

その結果、以下の結果が得られた。

- (1) 曝露により材料表面に汚損物質が堆積し、EVA系では撥水性の消失が見られた。台風等の急速汚損により累積電気量が急激な増加傾向を示したが、平常時の漏れ電流波高値は大きくなることなく十分な絶縁性能を保持していた。また、SiR系では局所的な撥水性の低下が見られたが、急速汚損時にもほとんど累積電気量は増加せず、平常時の漏れ電流波高値は非常に小さいため、長期曝露後も十分な絶縁性を保持していると考えられた。さらに、曝露環境が比較的緩やかな場所に再設置した場合は、一旦大きくなった累積電気量の増加傾向も小さくなることが明らかとなった。また、曝露試験で得られた累積電気量が磁器と比べ少なかったことから、ポリマー碍子の沿面距離は磁器碍子よりも短く出来ることが明らかとなった。
- (2) 材料表面に堆積した不溶性の汚損物質が吸湿した場合、試料表面の湿潤は容易になり導電性電流の発生が多くなることが示された。一方、ドライバンドアーク放電はNSDDが高くなると増加の傾向を示すが、NSDDが低い場合でも汚損物質が不均一なことにより増加することが明らかになった。さらに、NSDDが低い場合は、材料表面の水分による影響をより強く受けることが明らかとなった。このため、不溶性汚損物質付着密度は、加速劣化試験における重要なパラメータであることが明らかとなった。

- (3) 長期間実線路で使用された EVA 系, EPDM 系の罫子では局所的に組成の変化が見られたが, 累積電気量から十分な絶縁性能を保持していることが示された。SiR 系では 2 種類のレーストラックの罫子で撥水性の消失, 累積電気量の増加などが見られ, 耐汚損性能が失われていた。しかし, それ以外の SiR 系では局所的な撥水性の低下は見られたが, 累積電気量は少なく十分な絶縁性能及び撥水性を保持していることが明らかとなった。また, SiR 系の罫子の撥水性は, 試料表面に堆積している汚損物質の厚さや種類の影響を強く受けるということが示唆された。
- (4) 汚損物質の種類に関わらず, 交流課電時, 直流正極性課電時には接地側, 直流負極性課電時には課電側で主に放電が発生することを確認した。累積電気量や損耗量, 撥水性消失時間等の放電による影響は, 交流課電時に比べ直流課電時に大きな影響を受けた。

以上のように, ポリマー材料は実環境での曝露により表面に汚損物質が堆積し, その堆積物が撥水性や放電の発生に大きな影響を与えることが確認された。特に, 不溶性物質付着密度が低い場合には, 汚損物質によるギャップが生じることで放電の発生回数が増加することが明らかとなった。しかし, 10 年程度実線路において使用された実機においても局所的な表面撥水性の低下や組成の変化, 累積電気量の増加などは見られるものの, SiR 系レーストラック罫子を除き十分な絶縁性能を保持していた。また, 放電によるポリマー材料表面のエロージョンは, 交流課電時に比べ直流課電時に大きくなることが明らかになった。これらの結果は, 今後, 屋外用電気絶縁機器の外被材としてのポリマー材料の適用及び機器設計, 材料評価試験に大きく貢献するものと思われる。

6.2 今後の課題と展望

近年, 様々な研究機関において電氣的ストレスや世界各地における特有の環境ストレスに対して耐性のあるポリマー材料の開発研究が進められている。同時に, 屋外用電気絶縁機器を実際に使用する環境で曝露試験を行っている。しかし, 屋外用電気絶縁機器の外被材としてのポリマー材料に関する課題はまだ多く残されている。本研究においても幾つかの課題が残された。第 5 章で累積電気量や損耗量, 撥水性消失時間等の放電による影響は, 直流課電時に非常に大きくなることを示した。噴霧する電解液の導電率等のパラメータを変化させることで耐汚損特性をより詳細に検討することが望まれる。また, 放電の様子を撮影し, 放電箇所を明らかにすることで, 放電電気量と放電様相を関連付けすることで電気絶縁機器の設計をより良いもの出来ると思われる。今後, これらの点についても明らかにしていくことが望まれる。

日本はごくわずかな時間の停電も許されないような高度情報化社会であるとともに, 新規の配電設備設置が少ないこと等から, 国内での使用実績に乏しいポリマー材料の導入を敬遠してきた。しかし,

北米では既に広範囲に渡りポリマー材料の適用が進んでおり、長期使用時の実績が報告されている。また、日本国内でも相間スペーサーや避雷器容器としての適用は進んでいる。さらに、電圧階級が高い分野において、重汚損地区とされている沿岸等、各地での試験実績が報告されている。

上述したように、ポリマー材料及びポリマー機器の様々な研究・適用が進められている。本研究の成果は、ポリマー機器の長期信頼性を明らかにするとともに更なる機材改良、評価試験方法の改善に大きく貢献する。今後、屋外用電気絶縁機器の外被材としてのポリマー材料に大きな期待と注目が集められることが予想されるが、本論文の研究成果が発展のための礎の1つとなることを期待する。

最後に、今後、送配電系統や車両等への直流課電の適用は進んでいくと思われるが、本研究では、直・交流課電における汚損物質の電気的特性への影響を検討したのみである。今後は、長期信頼性の評価と共に、試料上を流れる漏れ電流と放電、劣化現象に関する研究をすすめていきたい。さらに、ポリマー材料が電気絶縁機器に広く利用されるように、そのための基盤・応用研究を幅広く展開していきたい。

付録

ポリマー材料の種類⁽²⁰⁾

電気絶縁機器に適用されているポリマー材料の主なものは、エポキシ樹脂(epoxy)、ポリエチレン(polyethylene)、エチレンプロピレンゴム(EPR: ethylene propylene rubber)、エチレンビニルアセテート(EVA: ethylene vinyl acetate)、シリコーンゴム(SiR: silicone rubber)である。これらのポリマー材料自体は良好な絶縁体であり、高い絶縁抵抗と沿面での絶縁破壊強化等の特性を有する。また、用途に合わせて合成・加工が可能であり、ATH や二酸化珪素（シリカ: SiO₂）等の無機材料の粉末を充填剤として混合することで、機械的強度や熱的特性の向上等が図られている。さらに、酸化防止剤や耐紫外線用の添加物等の効果により優れた材料物性を発揮するに至っている。各材料の特徴を以下に示す。

エポキシ樹脂

エポキシ樹脂は固体絶縁物としての機械的強度と電気絶縁強度を兼ね備えたものであり、各種送変電機器に幅広く適用されている。ただし、耐候性の問題等から、その用途は主に屋内に限られている。

ポリエチレン

経済性と取り扱いの簡便性等から、その適用範囲を拡大したものであるが、水分や異物の混入等により、絶縁性能が左右される傾向があり、製品加工にあたっては高度の品質管理が行われている。ポリエチレンの化学構造を図 1 に示す。

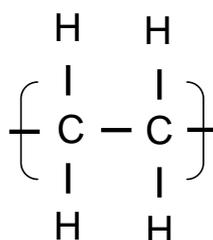


図 1 ポリエチレンの化学構造

エチレンプロピレンゴム

耐候性、耐薬品性に優れたゴム材料であり、長期間の屋外使用に関しても顕著な性能低下を見せないとされ、屋外設備の外被材等に適用されている。エチレンプロピレンゴムの化学構造を図 2. に示す。

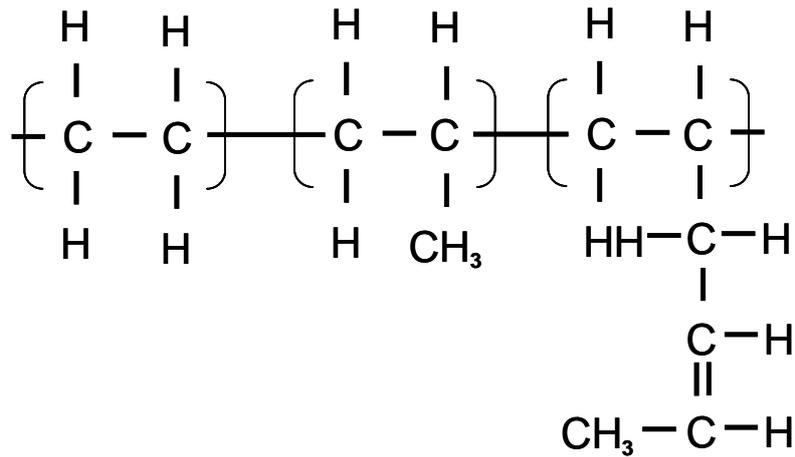


図2 エチレンプロピレンゴムの化学構造

エチレンビニルアセテート

耐候性、耐薬品性に優れたゴム材料であり、長期間の屋外使用に関しても顕著な性能低下を見せないとされ、屋外設備の外被材等に適用されている。エチレンビニルアセテートの化学構造を図3に示す。

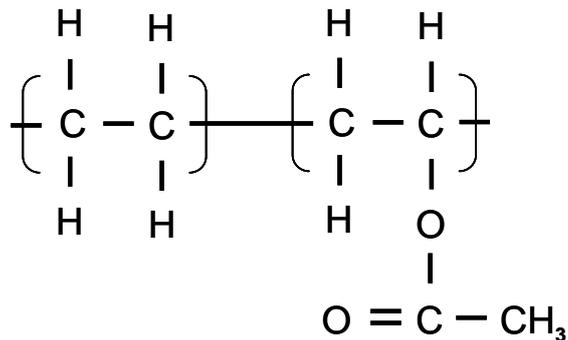


図3 エチレンビニルアセテートの化学構造

シリコーンゴム

図4にシリコーンゴムの化学構造を示す。シリコーンゴムの耐熱性、耐候性については、シリコーン材料が結合力の強いシロキサン結合 (O-Si-O) を骨格としているためと考えられている。また、耐紫外線性についても紫外線の持つエネルギー領域に対して、この結合エネルギーが大きいと考えられる⁽⁹⁾。一方、表面撥水性については、側鎖のメチル基 (CH₃) が、有機基としてはフルオロカーボン基 (CF_n) について小さい臨界表面張力を持つことから、フッ素系高分子に次ぐ優れた撥水性を有するものと考えられている⁽¹⁰⁾。特に、シリコーンゴムの固体材料中には、シリコーンオイルのような液状の低分子量成分が含まれており、この表面張力の小さい低分子量成分がポーラスな固体中を移動し、表面に分散することで、撥水性の表面層が形成されていることも考えられている⁽²⁾⁽²⁶⁾。

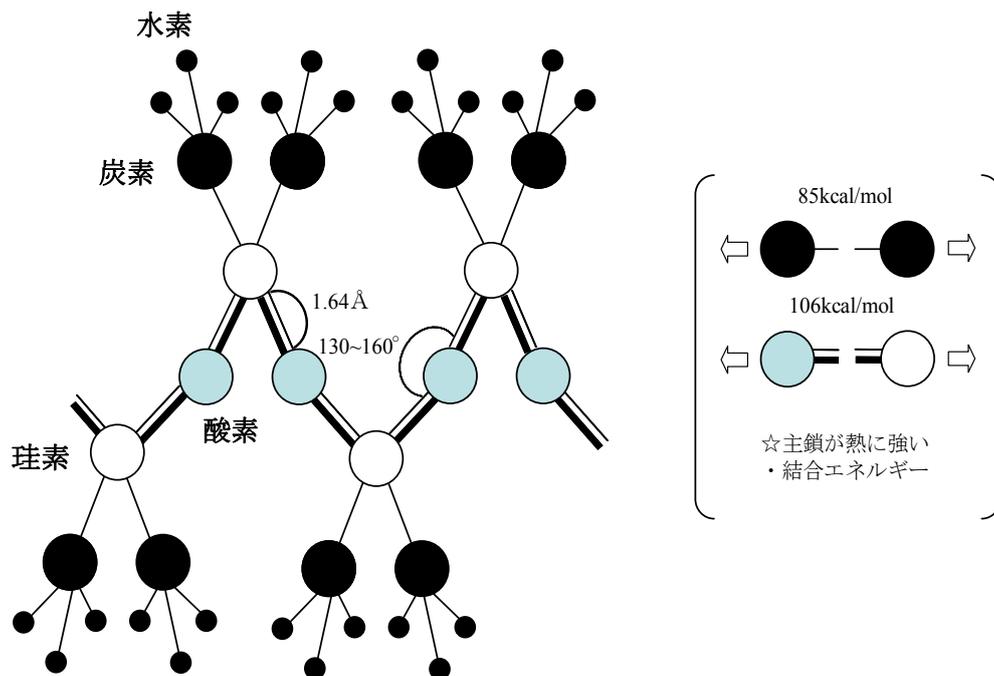
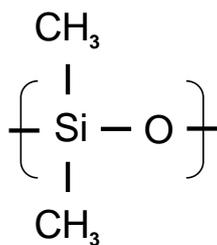


図4 シリコーンゴムの化学構造

ポリマー材料の特性

電気的特性

商用周波数, 注水, 雷インパルス及び開閉インパルスの各フラッシュオーバ電圧特性等の電気的特性は, 気中フラッシュオーバ距離 (dry arcing distance : 把持器具間の最小絶縁距離) により決まる。この特性は, 磁器碍子の特性とほぼ同等である。

耐アーク特性

ポリマー碍子は磁器碍子に比べ細径であるため, 把持金具はアーク電流による熱で溶断, 膨張変形し, また圧着部把持力が低下する場合がある。アークの挙動は, ポリマー碍子の形状や把持金具の取り付け形態の影響を受ける。

耐汚損特性

一般にポリマー罫子は撥水性を有し、優れた汚損耐電圧特性を示すが、試用期間が長くなると撥水性が低下し、表面が粗くなることにより汚損耐電圧特性は低下する。

ポリマー罫子の人工加速試験を行う場合、撥水性を有するために均一に汚損物を付着させることが難しい。一方、実際の環境では、ポリマー罫子表面に汚損物が付着する傾向がある。このため、ポリマー罫子の人工汚損試験では、汚損液に界面活性剤を入れる等して実環境に近い汚損状態を再現する方法が各研究機関で適用されている。しかし、ポリマー罫子の人工汚損試験方法は未だ確立されておらず、標準の試験方法も制定されていない。さらに、ポリマー罫子の汚損耐電圧特性は未解明な部分が多い。ポリマー罫子は、磁器罫子より短い表面漏れ距離でも良いと考えられてもいるが、現時点では磁器罫子と同等の表面漏れ距離を保つのが一般的である。

撥水性

シリコーンゴムをはじめとするポリマー材料は、これまで述べたように、磁器材料に比べて軽量で、機械的強度も大きく、耐汚損特性にも優れていること等の数々の利点を有する。ポリマー材料の様々な特性の中でも注目すべき特性として撥水性が挙げられる。シリコーンゴムの撥水性は、放電や汚損等によって水路が形成されたとしても、低分子量成分 (low molecule weight: LMW) の染み出しによる撥水性の回復が期待できる。以下に撥水性を評価する関係式、撥水性評価方法、撥水性の回復機構等について示す。

ヤング (Young) の式 ⁽²⁶⁾

固体表面の撥水性については、ヤングの式で説明することができる。固体表面の液体が、図に示すような状態にあるとすれば、3つの矢印で示す方向の力関係が釣りあっているので、(1) 式が成立する。この式をヤングの式という。図5にヤングの式のイメージを示す。

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos\theta \quad (1)$$

γ_S : 固体の表面張力, γ_L : 液体の表面張力, γ_{SL} : 固体・液体間の界面張力

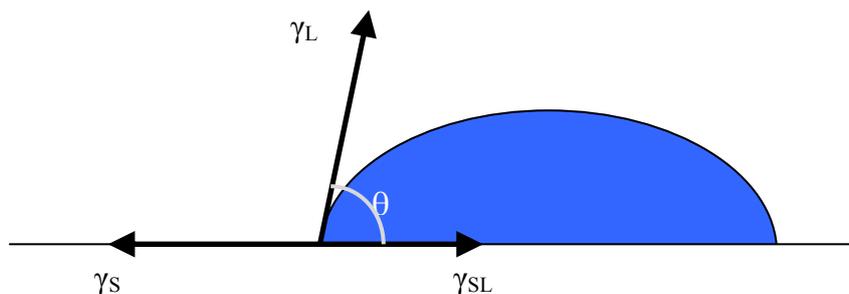


図5 ヤングの式におけるイメージ

撥水性評価方法⁽²⁰⁾

液滴法

一定量の水滴を試料と垂直に落とし、落とした水滴の半分の量を吸い取り、水滴の頂点の高さを (h)、水滴の半径を (a) として測定し、 $\theta = 2\arctan(h/a)$ より接触角を求める方法。図6に詳細を示す。

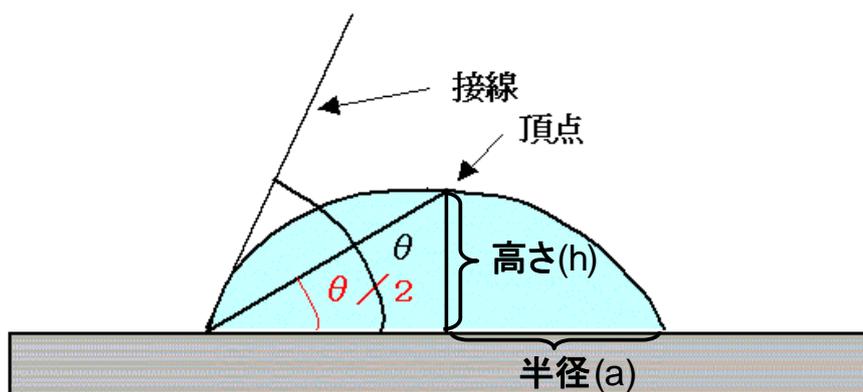


図6 液滴法

転落法

固定した試料を傾斜させ液滴が滑り始める時に止め、この時の諸角度を求める。前進接触角 θ_1 と後退接触角 θ_2 の差や後退接触角の大きさは、試料表面の劣化状態の進展に対応して、それぞれ増加したり減少したりすることが多く、撥水性低下現象の評価に多く用いられている。試料表面は水平のままとして、固体表面に形成した水滴の体積の一部を吸引する ($100\mu\text{l} \rightarrow 50\mu\text{l}$) ことにより、水滴の接触面が小さくなりつつある時の接触角を求め、後退接触角として評価する方法もある。図7に詳細を示す。

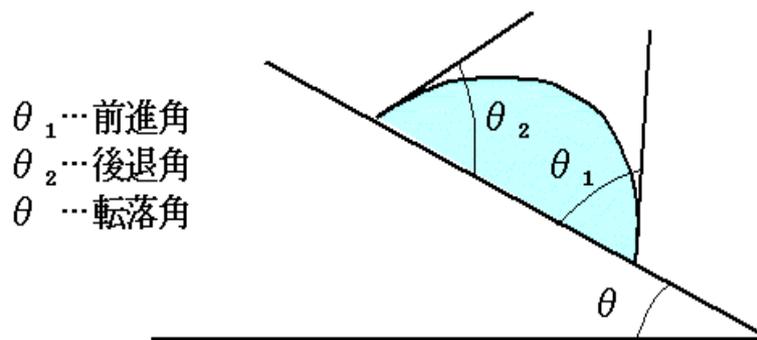


図7 転落法

傾斜法

試液中に測定体を立て、徐々に傾斜させ左面にメニスカス（界面張力によって細管内の液体がつくる凸状または凹状の曲面）が無くなった時に止め、そのときの θ を測定する方法。棒状の物体が適する。図8に詳細を示す。

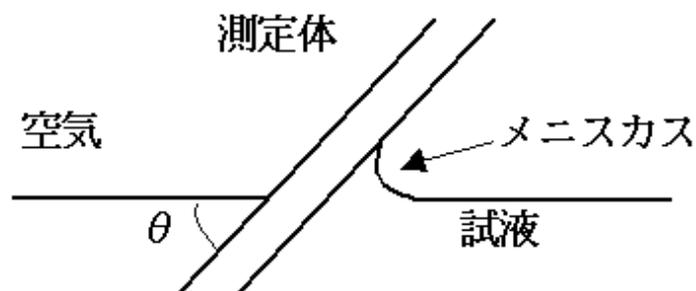


図8 傾斜法

STRI 法⁽⁸⁾

試料表面に市販されている霧吹きを用いて、1秒に1~2回の割合で約20秒間浄水を吹き付け、試料表面に残った水滴の形状によって撥水性を7段階の Hydrophobicity classification :HC に分けて評価する方法。また、撥水性クラスは最高の撥水性を HC 1 としており、数字が大きい程撥水性が低下していることを意味する。この方法を用いれば、劣化後の試料表面が荒れ、表面状態が均一でなくなり接触角に対する測定場所の影響が大きい場合にも有効である。図9に接触角の定義を示す。図9で a は水平、b は斜面の場合で、 θ_a が前進接触角、 θ_r が後退接触角である。表1に撥水性クラス (HC) の分類基準をそれぞれ示す。図10に撥水性のクラス分けを示す。同図中には示していないが、HC 7 は表面を一様に水膜が覆った状態である。

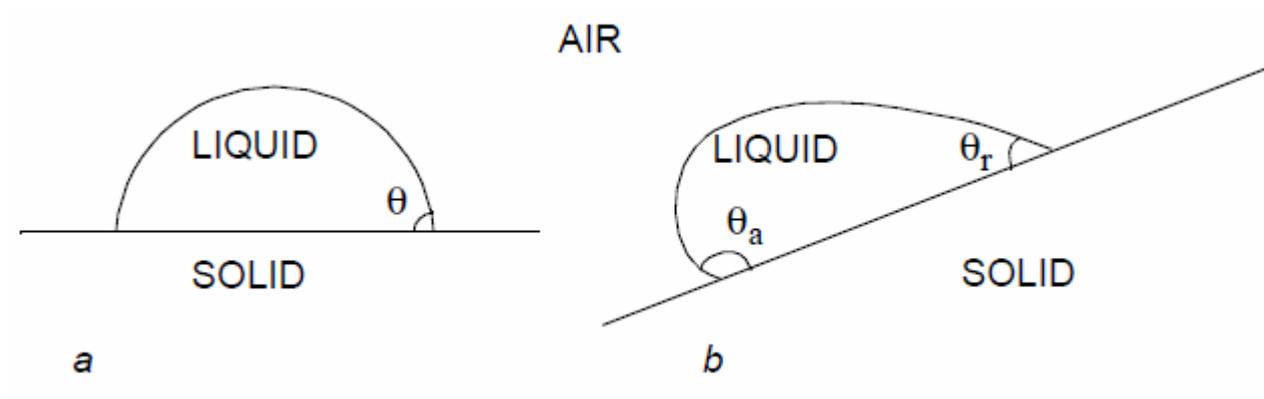


図9 接触角の定義

表1 STRI法撥水性クラス分類の基準

HC	Description
1	Only discrete droplets are formed. $\theta_r \approx 80^\circ$ or larger for the majority of droplets.
2	Only discrete droplets are formed. $50^\circ < \theta_r < 80^\circ$ for the majority of droplets.
3	Only discrete droplets are formed. $20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ for the majority of droplets. Usually they are no longer circular.
4	Both discrete droplets and wetted traces from the water runnels are observed (i.e. $\theta_r = 0^\circ$). Completely wetted areas $< 2 \text{ cm}^2$. Together they cover $< 90\%$ of the tested area.
5	Some completely wetted areas $> 2 \text{ cm}^2$, which cover $< 90\%$ of the tested area.
6	Wetted areas cover $> 90\%$, i.e. small unwetted areas (spots/traces) are still observed.
7	Continuous water film over the whole tested area.

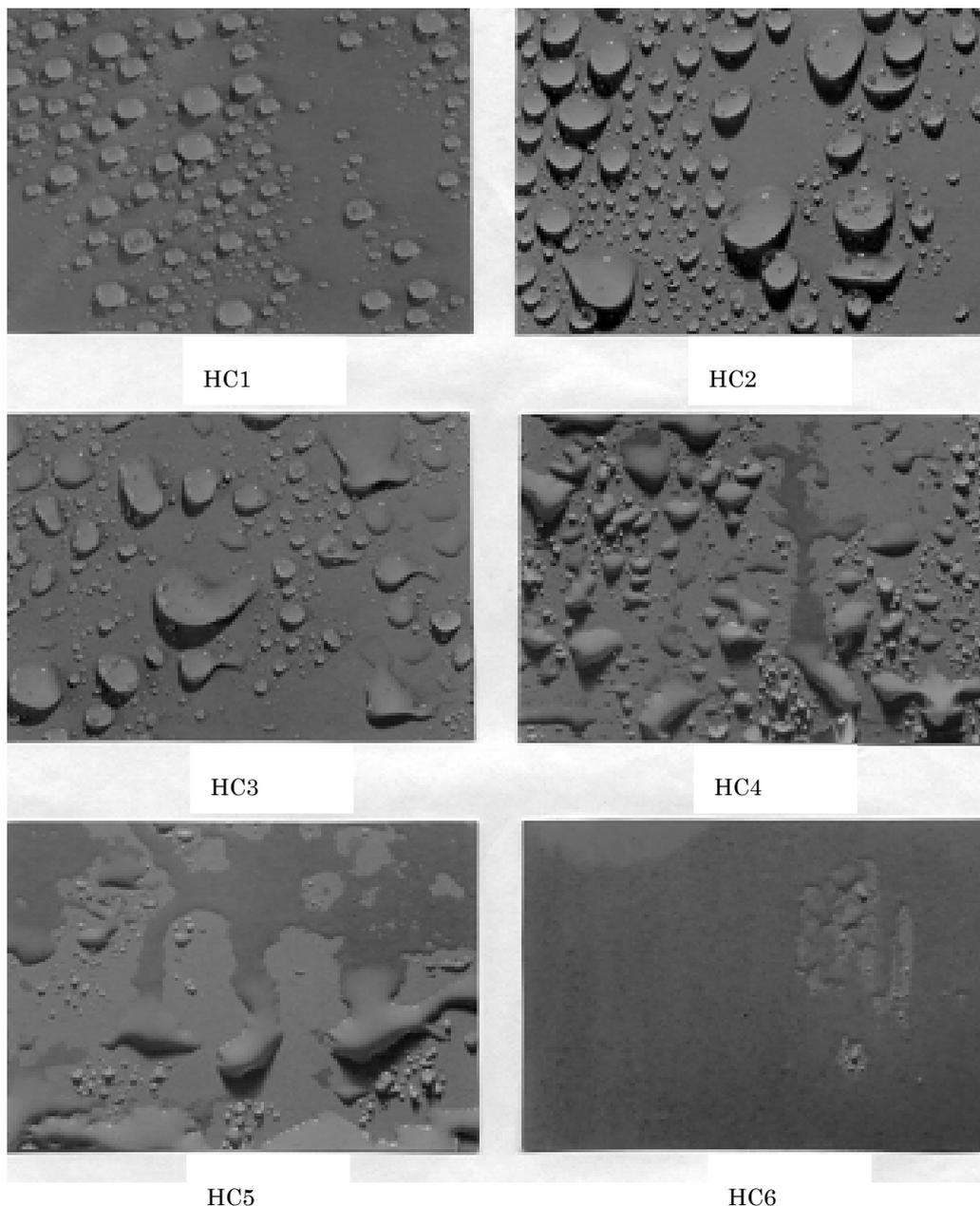


図 10 撥水性クラスの例⁽⁸⁾ (HC1~6)

シリコーンゴムにおける撥水性の回復機構

シリコーンゴムの表面撥水性については、材料中の可動性の低分子成分が表面に一様に分散し、疎水性の表面を形成することが特徴的であると言われており、降雨や放電によりその低分子成分が喪失して撥水性が低下した後も、時間経過に伴い、材料内部から表面に染み出す。その結果、撥水性が次第に回復することが報告されている^{(20) (25) (27)}。特に、この低分子成分の表面分散については、表面を覆っている汚損層を包み込むように表面まで染み出してくること(アメーバ効果)が言われ、この作用により、磁器等に比べ高い汚損絶縁性能を長期間維持できると考えられている。また、この撥水性の時間変化特性については、表面付近のシロキサン基(極性基)およびメチル基(非極性基)が反転することの効果

等が指摘されているものの、これまでに、その表面での極性基挙動と撥水性の時間的変化の相関等はあまり検討されていない⁽²⁸⁾。図11に低分子成分の表面分散あるいは極性基の反転による撥水性回復メカニズムを示す⁽²⁰⁾。

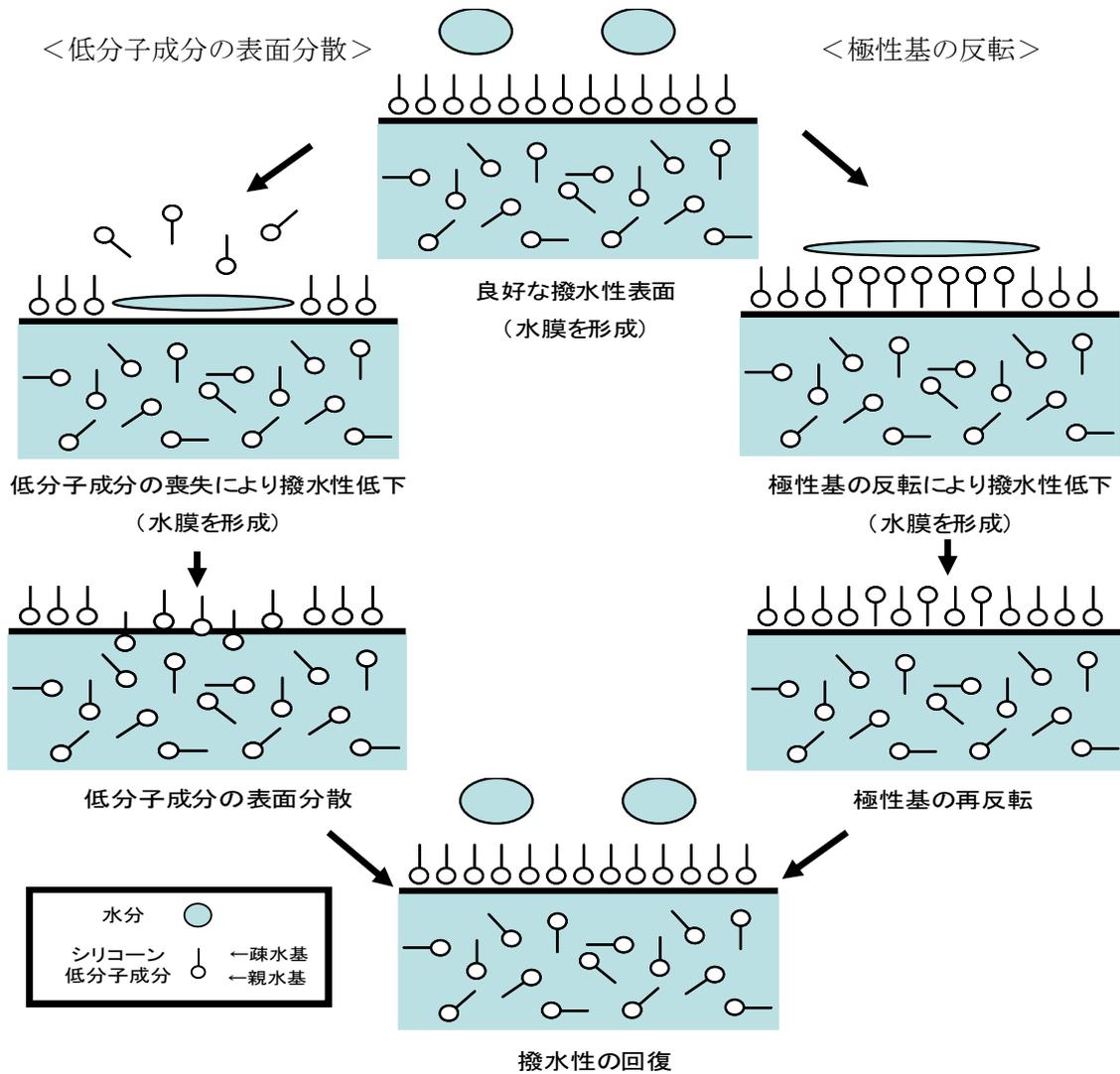


図11 低分子成分の表面分散あるいは極性基の反転による撥水性回復機構

この低分子成分の表面分散あるいは極性基の反転による撥水性回復効果も、材料自身の表面劣化の進行に伴い変化することが推測され、実使用環境でのシリコーンゴムの撥水性挙動と表面劣化特性の解明等が、その汚損絶縁性能の検証には不可欠となっている。

ポリマー材料の劣化要因

環境因子と劣化作用⁽⁶⁾

ポリマー材料を電力用絶縁機器として屋外で使用する際、問題となるのは、高電圧が印加されることで各種の自然環境因子による作用が加速されることである。表2に環境因子と、その劣化作用との関係を示す。太陽光の中に含まれる紫外線は、屋外用ポリマー絶縁物の紫外線劣化（高分子鎖の切断）を促進させる基本的な因子である。雨や結露による水分は、材料表面の絶縁性能を低下させると共に、吸湿により誘電率 ϵ や誘電正接 $\tan\delta$ を増加させ、電気的特性に大きく影響する因子である。塩分や塵埃は、水分と結びついて材料表面の絶縁抵抗を低下させ、電気的ストレスの影響をより多く受けやすくする。大気汚染ガスも水分と結びついて塩分や塵埃と同様な作用をして劣化を加速させ、時には材料の充填剤と反応して絶縁抵抗を低下させる。季節や昼夜の温度変化は、材料に繰り返し熱ストレスを与え、機械的破壊の原因になることもある。これらの各種劣化因子の相乗作用を受けて、ポリマー材料の劣化は促進される。

劣化過程の例を図12に示した。

表 2.2 環境因子と劣化作用

環境因子	劣化作用
太陽光の紫外線	紫外線劣化（高分子鎖の切断）
雨・霧の水分	湿度劣化（ $\epsilon \cdot \tan\delta$ の増加，破壊電圧・低効率の低下）
塩分・塵埃・大気汚染ガス	大気汚染ガスとの反応，導電率の増大
温度変化	熱ストレスを繰り返すことによる機械的強度の低下

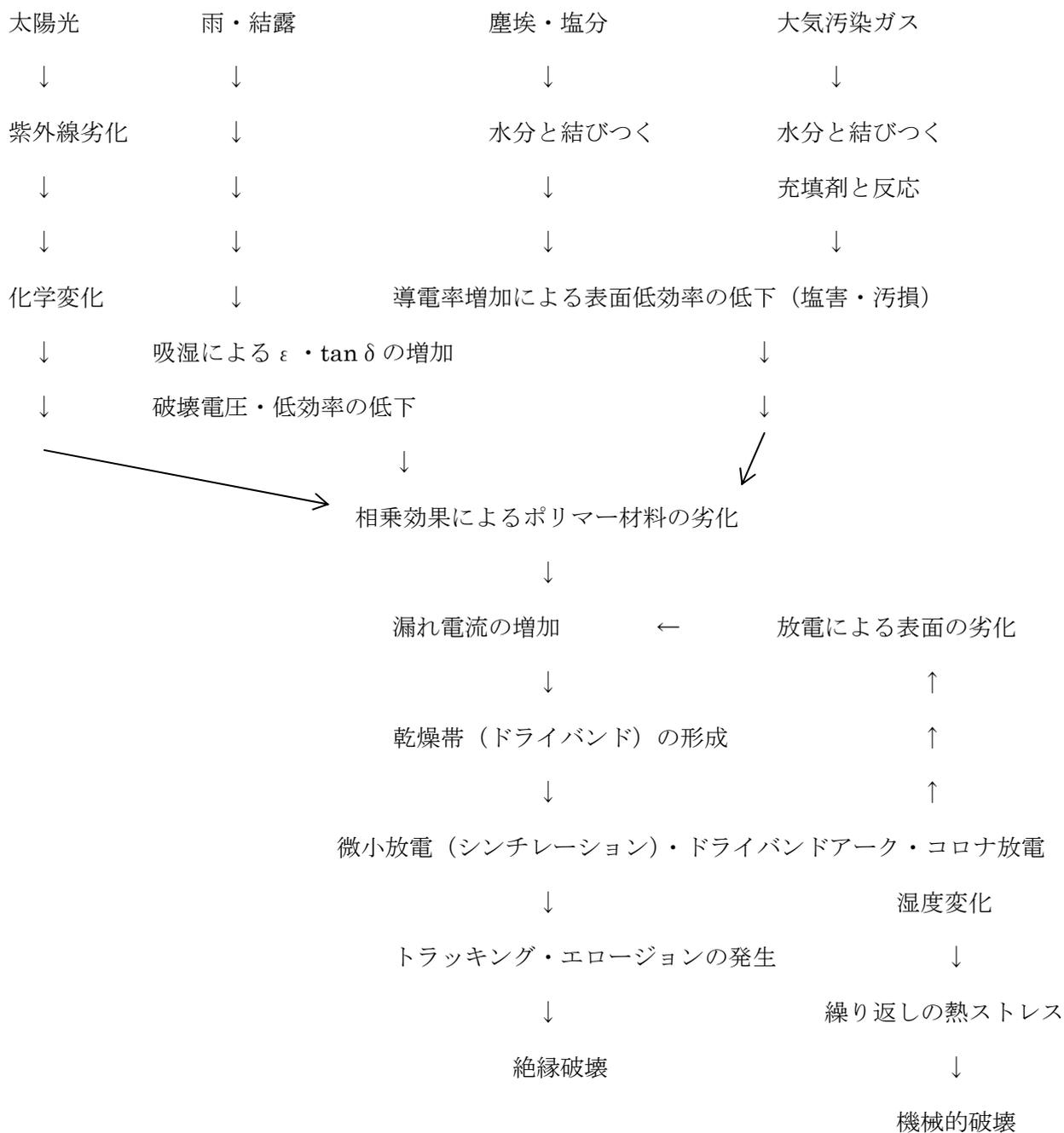


図 12 環境因子と劣化過程

放電現象と劣化現象

紫外線により絶縁物表面が化学変化した状態で塩やダスト、大気汚染ガスなどの汚損物質が付着し雨や結露によって湿潤状態になると、表面の絶縁抵抗が低下し、漏れ電流が増加する。この電流のジュール熱によって表面の一部に乾燥帯（ドライバンド）が形成され、この部分でコロナ放電やドライバンドアーク放電が発生し、トラッキングやエロージョンが生じやすくなり最終的には絶縁破壊に至る。以下に代表的な放電現象と劣化現象を示す。

ドライバンドアーク放電 (Dry band arc discharge) ^{(5) (29)}

汚損湿潤状態の絶縁材が課電状態にある時、汚損湿潤層に流れる導電性電流のジュール熱により水分が蒸発し、乾燥帯が生じる。その乾燥帯を挟む水滴間で発生する弧状の放電のことをドライバンドアーク放電という。この放電は、強い光を放ち、熱電離の状態で気体温度が高く電界は低い。電極からの電子の放出が γ 作用以外のものが主となる放電の形態で、放電の最終形態となる。ドライバンドアーク放電の発生に伴い、電圧ゼロの時点（ゼロクロス）から遅れて急激に立ち上がる電流が観測され、また電圧低下によるアークの消滅に伴い、急速に電流は減少する⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。材料表面を侵食（重量減少）し、甚大な劣化を導くと考えられている。

コロナ放電 (Corona discharge) ⁽²⁹⁾

電圧が高い場合、電界の強い部分が局部的に存在するような不平等電界下での現象である。コロナ放電は、不平等電界によってドライバンドや水滴に関係なく電極の付近に局部的に持続する放電で、アークと比較すると温度が低く光の輝度が低い。ただし、光子エネルギーは、シリコーンの撥水性を維持する Si-C 結合の結合エネルギーである、88 kcal/mol (3.8 eV) を上回ることから容易に分子鎖切断を引き起こし、撥水性の低下をもたらすものと考えられる。

エロージョン (Erosion) ^{(2) (24)}

ポリマー材料表面の劣化現象の一つ。エロージョンは、絶縁材料の表面に導電性のない質量減少を伴う侵食が発生する状態をいう。その侵食は全表面を覆う場合や局部に集中して発生する場合、放射状に発生する場合と様々である。ポリマー磚子の場合、通常は放射状に跡を残し発生する。

トラッキング (Tracking) ^{(2) (24)}

ポリマー材料の表面の劣化現象の一つ。トラッキングは、絶縁材料の表面に導電性の経路が発生する状態をいう。その経路は、乾燥した状態においても導電性を持つ。トラッキングは外被材表面でも発生するほか、絶縁材料間の界面（FRP コア-外被ゴム間）にも発生する。

チョーキング (chalking)

ポリマー材料の表面の劣化現象の一つ。材料表面が暴露状態の際に紫外線・熱・水分・風等により塗装面の表層樹脂が劣化し、塗料の色成分の顔料がチョーク（白墨）のような粉状になって顕われる現象や状態をいう。

シリコーンゴムの劣化

ポリマー材料のなかでもシリコーンゴムは優れた撥水性と耐汚損特性を有している。放電によるシリコーンゴムの劣化過程を R.S. Gorur の仮説に基づいて説明する。また、図 12 にシリコーンゴム表面における撥水性の時間変化を示す⁽²⁰⁾。

表面の低分子ポリマー成分の減少

シリコーンゴム表面乾燥帯での放電は撥水性表面を親水性に変えることが実験で確認されている。しかし、時間の経過とともに撥水性は回復する。これはシリコーンゴム表面の低分子ポリマーの存在によるもので、シリコーンゴム表面が劣化すると低分子ポリマーの量は新品のものに比べて減少しており、以下のように説明できる。乾燥帯での放電は、長い分子鎖（分子量が 10000 以上）をそれ以下の短い分子鎖に切断し、この過程によって遊離基（最外殻に余分に、又は不足して電子量を持つもの）を増加させる。遊離基は非常に反応性が高く、シロキサン結合を加水分解して環状分子、又はシラノールと呼ばれる小さな分子へと変わる。分子の大きさが小さくなるのでシラノールはより水溶性になり、環状分子はより変化しやすくなる。このようにシラノールは水に混ざるので劣化後にはシリコーンゴム表面の低分子成分の量は減少する。このため、新品と劣化後のシリコーンゴムとでは表面に形成される水膜の厚さに差が生じる。

低分子ポリマーは、塵などの粒子や、シリコーンゴムに添加されていて表面に露出されている充填剤粒子を包み込むことができるので、低分子成分の量が減少すると、吸湿性の塵や充填剤粒子は水を吸収してより厚い水膜を形成し、その結果シリコーンゴムの表面抵抗は低くなり、漏れ電流が増加する。

表面粗さの増大

劣化によって材料表面の粗さが増大し、それに従い表面の濡れている部分の面積と漏れ電流が徐々に増加する。シリコーンゴムに添加されている充填剤（三水和アルミナ）は、耐トラッキング性・耐エロージョン性があり、物理的・化学的にシリコーンゴムと反応し、乾燥帯での放電で生じる生成物による品質低下を妨げる働きがある。しかし、ポリマー表面の分解は、劣化と共に進む。これは、ポリマー表面の充填剤とポリマー間の相互作用が弱まることを意味しており、この状態での充填剤は独立した粒子として振る舞う。また充填剤粒子は吸湿性を有するため高湿度の条件下では厚い水膜を形成し、耐トラッキング性・耐エロージョン性の低下を招く。分解され短くなった分子鎖は長い分子鎖より少ないエネルギーで浸食されるので、耐トラッキング性・耐エロージョン性がさらに低下する。このようにして、充填剤の効果以上に乾燥帯で過度に放電が起こるとき、トラッキングやエロージョンが発生する。

充填剤粒子の凝集

低分子ポリマーの減少とポリマー表面の分解が進行すると充填剤粒子の凝集が起こり、ポリマー材料表面には、充填剤粒子の塊が存在するようになる。充填剤粒子が大きくなるのでポリマーとの相互作用は減少し、更に耐トラッキング性・耐エロージョン性は低下する。

ポリマーの結晶化

劣化していない状態でのポリマーは非結晶状態で、ポリマーと充填剤間の相互作用を等しくし、ポリマー内部から外部への低分子ポリマーの拡散を容易にしている。しかし、劣化の進行によってポリマーの結晶化が進み物理的構造の変化が起こり、ポリマー分子は格子の中の、一定の状態に押し込められ充填剤との相互作用は弱まり、耐トラッキング性・耐エロージョン性は低下する。

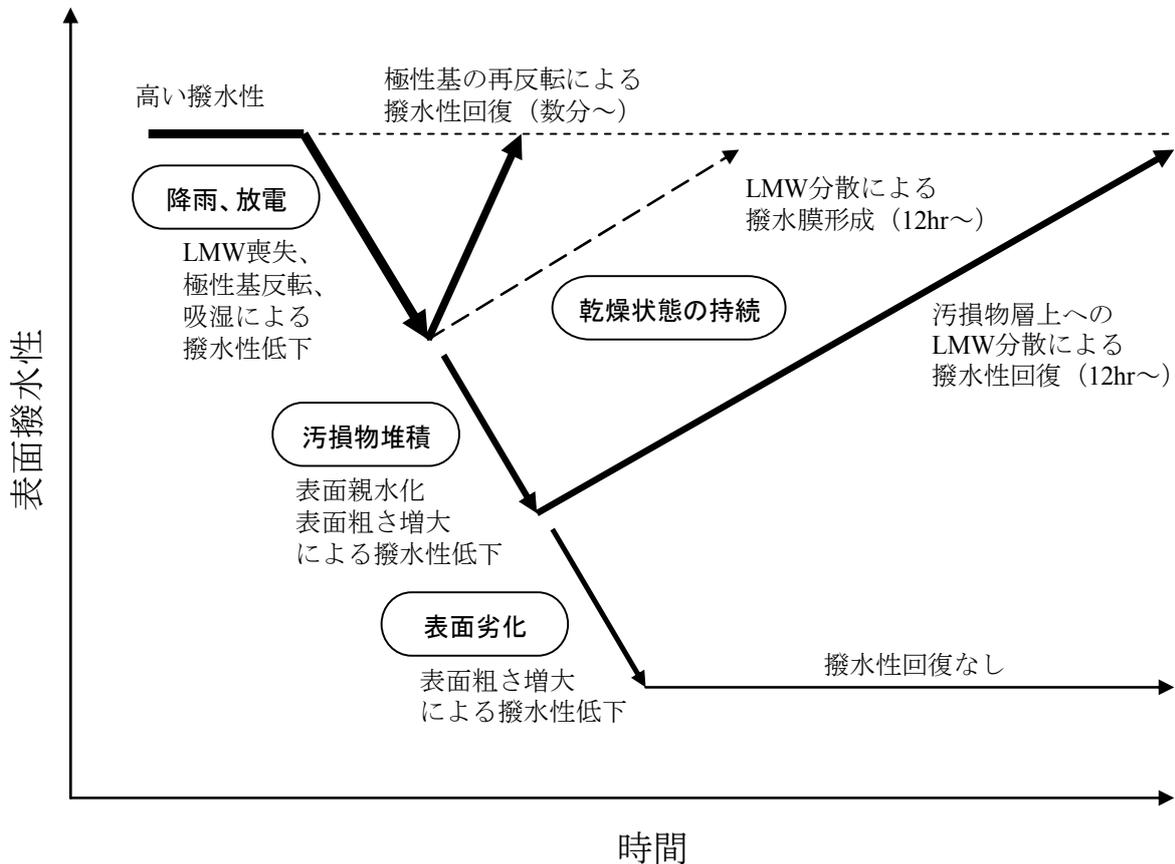


図 13 シリコーンゴム表面における撥水性の時間変化

参考文献

- (1) 関根泰次,「送配電工学」, オーム社, pp.93-118, 1989
- (2) R. Hackam : “Out door HV Composite Polymeric Insulators “, IEEE Trans. DEI, Vol.6, No.5, pp.557-585, 1999
- (3) 今城:「送配電コンパクト化技術の開発 高分子材料の適用」,電中研レビュー, No.36, pp.1-65, 1998
- (4) 梅田, 越野, 西鳥羽:「ポリマーがいし用シリコーンゴムの表面撥水性についての基礎研究」, NGK レビュー, 第 59 号, pp.9-16, 2002
- (5) 西村:「塩塵汚損沿面放電現象に及ぼす電解液の性状と種類の影響」, 静電気学会誌, Vol.12, No.3, pp.213-218, 1989
- (6) 西村:「ポリマー碍子の劣化と寿命評価」, 電気評論, 第 399 号, Vol.83, No.11, pp.42-48, 1998
- (7) 真瀬, 五十川, 菅原, 塙:「鉄道分野用ポリマがいし」, 日立化成テクニカルレポート No.42, 2004
- (8) STRI Guide 9211, “Hydrophobicity Classification Guide,” 1992
- (9) IEC 61109, “Composite insulators for ac overhead lines with a normal voltage greater than 1000V Definitions, test methods and acceptance criteria”, International standard
- (10) 山本, 朱, 大坪, 本田, 竹之内, 橋本, 大野:「複合加速劣化試験における試験条件と放電電気量の関係」, 放電/誘電・絶縁材料/高電圧合同研究会, ED-05-03, DEI-05-03, HV-05-03, 2005
- (11) Hirofumi Yamamoto, Masafumi Fujimoto, Yong Zhu, Kenichi Haji, Takuma Miyake, Masahisa Otsubo, Chikahisa Honda, Osamu Takenouchi , Akinori Ohno: “Lifetime Evaluation of EVA Insulator for Distribution System by Accelerated Salt-fog Test”, 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.305-308, 2005
- (12) Google Earth : Image, 2007 TerraMetrics, 2007 ZENRIN
- (13) <http://www.jma.go.jp>
- (14) M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O. Takenouchi, T. Sakoda and Y. Hashimoto: “Evaluation of Insulation Performance on Polymeric Surface by a Novel Separation Technique of Leakage Current”, IEEE Trans. DEI, Vol. 10, No. 6, pp.1053-1060, 2003
- (15) 小林, 松崎, 新子谷, 木股:「架空送電線複合がいしの開発 (その 2)」, 古河電工時報, 第 108 号, pp.55-60, 2001
- (16) 石原, 荒川, 石割 他:「ポリマー碍子の汚損特性」, NGK レビュー, No.57, pp.19-29, 1998

- (17) T. Miyake, Yuya Seo, Tatsuya Sakoda, and Masahisa Otsubo, "Relationship between Leakage Current and Pollution Deposits on the Surface of Polymeric Insulator", IEEJ Trans. FM, Vol.130, No.11, pp. 1037 - 1041, 2010
- (18) 木挽, 平野:「耐塩素水性に優れた EPDM の開発」, 三菱電線工業時報, 第 105 号, pp.54-58, 2008
- (19) 堀井 他:放電ハンドブック, 上巻, pp.190-216, 1998
- (20) 本間:「シリコーンゴムの外部絶縁性能評価のための撥水性および経年劣化に関する研究」, 横浜国立大学 博士論文, 2001
- (21) 畔柳, 谷口, 本間, 泉:「高分子絶縁材料の直流課電における表面劣化様相の基礎検討」, 電力中央研究所報告, W96016, 1997
- (22) J. Kindersberger, R. Bärsch: CIGRE WG D1.14 1st draft, 2004
- (23) J. Kindersberger, R. Bärsch, F. Exl, W. Haverkamp, H. Janssen, X. Kornmann, U. Maßen, M. Nagao, J. Seifert, D. Windmar and H.-J. Winter: "Evaluation of dynamic hydrophobicity properties of polymeric materials for non-ceramic outdoor insulation, Retention and transfer of hydrophobicity", CIGRE WG D1.14 2nd draft, pp.9-41, 2008
- (24) 伊藤:「シリコーンハンドブック」, 日刊工業新聞社, pp.275-318, 1990
- (25) J.Kim, M.K.Chaudhury and M.J.Owen: "Hydrophobicity Loss and Recovery of Silicone HV Insulation", IEEE Trans. DEI, Vol.6, No.5, pp.695-702, 1999
- (26) 井本:「表面張力の理解のために」, 高分子刊行会, pp.73-77, 1993
- (27) Hillborg,H.and U.W.Gedde: "Hydrophobicity Changes in Silicone Rubbers", IEEE Trans.DEI, Vol.6, No.5, pp.703-717, 1999
- (28) Reynders, J.P., I.R. Jandrell and S.M. Reynders", Review of Aging and Recovery of Silicone Rubber Insulation for Outdoor Use", IEEE Trans. PD, Vol.6, No.5, pp.620-631, 1999
- (29) 植月 他:「高電圧工学」, コロナ社, pp.34-61, 2006
- (30) 大坪, 橋口, 本田, 竹之内:「塩霧試験における漏れ電流の自動分離・解析法の提案」, 電気学会論文誌 A, Vol.122, pp.123-124, 2002
- (31) 西村, 佐藤, 柳瀬, 尾崎, 岩間:「外部絶縁の汚損進行に伴う沿面漏れ電流の推移」, 電学, 高電圧研究会, HV-90-3, pp.19-28, 1990

本論文に関連する学術論文と学会発表論文

学術論文

- (1) T. Miyake, Yuya Seo, Tatsuya Sakoda, and Masahisa Otsubo, “Relationship between Leakage Current and Pollution Deposits on the Surface of Polymeric Insulator”, IEEJ Trans. FM, Vol.130, No.11, pp. 1037 - 1041, 2010
- (2) T. Miyake, Y. Arata, T. Sakoda, Masahisa Otsubo, Y. Sonoda, and H. Yamaguchi, “Assessing Long-term Reliability of Polymeric Housing Materials”, 電学論B, Vol. 131, No. 6, pp. 530 – 531, 2011
- (3) Yuya Seo, Norihito Oshikawa, Takuma Miyake, Tatsuya Sakoda, Masahisa Otsubo, and Tomikazu Anjiki, “Characteristics of Hydrophobicity Loss on Silicone Rubber Surface”, Nanoscale Research Letters, 2011, to be published.

その他の論文 (学位論文に直接関係しない, 有審査の学術論文)

- (1) 椎原大輝, 荒田由浩, 栢健一, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 「Dynamic Drop Test における帯電及び塩分による試料表面の撥水性への影響」, 電学論A, Vol. 129, No. 9, pp. 657–663, 2009

国際学会発表論文

- (1) T. Miyake, Y. Yamashita, T. Sakoda, M. Otsubo, and S. Tanaka, “Study on Long-term Reliability of Polymeric Insulator”, Proceedings of 2008 Asian Conference on Electrical Discharge, Bandung, Indonesia, pp.131-134, 2008
- (2) Y. Yamashita, T. Miyake, K. Haji, T. Sakoda, and M. Otsubo, “Relation Between Leakage Current and NSDD on the Surface of Polymer Insulator”, Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials, Yokkaichi, Japan, pp.103-106, 2008
- (3) A. Kano, Y. Seo, T. Miyake, and M. Otsubo, “Study on Relation between Leakage Current and Pollution Deposits on the Surface of Polymeric Insulator”, Proceedings of 2009 Korea - Japan Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, Busan, Korea, pp.238-241, 2009
- (4) T. Miyake, Y. Seo, T. Sakoda, M. Otsubo, and T. Anjiki, “Study on Insulation Degradation Difference

between AC and DC applications”, Proceedings of 15th Asian Conference on Electrical Discharge, Xian, China, 2010

(5) Yuya seo, Norihito Oshikawa, Takuma Miyake, Tatsuya Sakoda, Masahisa Otsubo, and Tomikazu Anjiki, “Characteristics of Hydrophobicity Loss on Silicone Rubber Surface”, IFFM,

国内学会発表論文

- (1) 山下洋平, 佐伯龍美, 三宅琢磨, 栢 健一, 椎原大輝, 迫田達也, 大坪昌久, 「不溶性物質による定量的汚損が漏れ電流に与える影響」, 電気関係学会九州支部連合大会, 2008
- (2) 椎原大輝, 栢 健一, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 「シリコンゴム表面の撥水性挙動に関する検討」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 2008
- (3) 三宅琢磨, 山下洋平, 佐伯龍美, 迫田達也, 大坪昌久, 「漏れ電流と不溶性物質付着密度の相関性」, 放電 誘電・絶縁材料 高電圧合同研究会, 2009
- (4) 椎原大輝, 荒田由浩, 栢 健一, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 「Dynamic Drop Testにおける撥水性低下要因に関する諸検討」, 放電 誘電・絶縁材料 高電圧合同研究会, 2009
- (5) 三宅琢磨, 山下洋平, 佐伯龍美, 迫田達也, 大坪昌久, 「汚損堆積物が放電に与える影響」, 電気学会全国大会, 2009
- (6) 叶明文, 瀬尾裕也, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 「ポリマー罫子の汚損堆積物と漏れ電流の相関性について」, 基礎・材料・共通部門大会, 2009
- (7) 瀬尾裕也, 叶明文, 三宅琢磨, 大坪昌久, 「ポリマー罫子外被材の複合汚損試験における漏れ電流特性に関する検討」, 電気関係学会九州支部連合大会, 2009
- (8) 三宅琢磨, 瀬尾裕也, 叶明文, 迫田達也, 大坪昌久, 「ポリマー材料への複合汚損の影響」, 放電 誘電・絶縁材料 高電圧合同研究会, 2010
- (9) 押川典仁, 瀬尾裕也, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 「Dynamic Drop Testにおける撥水性特性の検討」, 電気関係学会九州支部連合大会, 2010
- (10) 瀬尾裕也, 押川典仁, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 「Dynamic Drop Testにおける直流課電時のシリコンゴム表面の撥水性消失特性」, 電気学会全国大会, 2011
- (11) 押川典仁, 瀬尾裕也, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 安食富和, 「Dynamic Drop Testの滴下数変化によるシリコンゴム表面の撥水性消失特性」, 電気設備学会全国大会, 2011
- (12) 瀬尾裕也, 押川典仁, 三宅琢磨, 迫田達也, 大坪昌久, 安食富和, 「電気絶縁機器用シリコンゴムの汚損塩霧試験における漏れ電流の比較」, 電気設備学会全国大会, 2011

- (13) 押川典仁, 瀬尾裕也, 三宅琢磨, 迫田達也, 安食富和, 「複合汚損試験によるシリコンゴムの放電開始時間の検討」, 高電圧研究会, 2011

謝辞

本研究の遂行、ならびに本論文の作成に当たりまして終始熱心なる御指導、ご鞭撻を賜りました、大坪昌久教授、迫田達也准教授に心より感謝致します。

また、本論文の審査に当たり、熱心な審査及び有益なご助言をいただきました宮崎大学工学部の林則行教授、酒井剛教授、吉野賢二准教授、宮崎大学 IR 推進機構の田島大輔特任助教に心より感謝します。さらに、本研究の遂行に関して貴重な助言を賜りました本田親久宮崎大学名誉教授に心より感謝致します。

本研究は、宮崎大学工学部電気電子工学科電力研究室ポリマーグループの多くの方の御協力が進められ、貴重な御意見をたくさんいただくとともに、様々な面において相談に乗っていただきました。共に同じグループとして研究を行った、平成 18 年度博士後期課程修了の朱勇博士、平成 21 年度博士後期課程修了の栢健一博士、平成 18 年度博士前期課程修了の山本浩文氏、平成 20 年度修士課程修了の山下洋平氏、平成 17 年度卒業の藤本将文氏、平成 21 年度修士課程修了の椎原大輝氏、叶明文氏、平成 22 年度修士課程修了の荒田由浩氏、平成 20 年度卒業の佐伯龍美氏、修士課程 2 年の瀬尾裕也氏、修士課程 1 年の押川典仁氏、本田一史氏、工学部電気電子工学科 4 年の山本真太郎氏、吉本周平氏に深く感謝致します。

本研究の一部は、平成 20 年度において、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費奨励研究の助成採択テーマ『ポリマー碍子の汚損を模擬した長期寿命評価法の開発』（課題番号：20920021、研究代表者：三宅琢磨、助成期間 1 年）の支援により実施されました。深くお礼申し上げます。

また、大学での研究生活を送るに当たり、研究室で共に楽しく過ごしてきた平成 16 年から平成 23 年の修士学生および学部生の皆様に厚くお礼申し上げます。再筆とはなりますが、上記の皆様方の長期にわたる絶大なる御協力に感謝すると共に心から御礼申し上げます。

本論文のテーマの一つである、ポリマー碍子の長期信頼性評価に関する研究において、共同研究をさせていただき、研究を通じて多大なるご指導、ご協力をいただきました九州電力（株）の大野哲雅氏、田中将氏、坂江摩己氏、園田靖史氏、古河征二氏、同じく本論文のテーマの一つである、直・交流課電時のポリマー材料の電気的特性に関する研究において共同研究をさせていただき、研究を通じて多大なるご指導、ご協力いただきました（株）東芝の山本浩義氏、安藤秀泰氏、小松克明氏、安食富和氏、原田智史氏に深く感謝の意を表します。

最後に、宮崎大学での 4 年に渡る博士課程を影ながら温かく見守ってくれた妻に深く感謝致します。

平成 24 年 3 月

著者